

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## LOKALIZAČNÝ MODUL PRACUJÍCÍ V SÍTI IOT

LOCALIZATION MODULE FOR IOT NETWORK

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Eliáš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Erik Herceg

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Martin Eliáš

**ID:** 211560

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Lokalizačný modul pracující v síti IoT

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte technologii bezdrátového přenosu dat pomocí sítí IoT (LoRa, Sigfox, NB-IoT). S pomocí vývojového kitu na platformě STM32 ověřte správnou funkčnost posílání dat a vypočtete předpokládanou dobu provozu na akumulátor. Zvolte vhodný modul pro připojení zařízení do sítě IoT s důrazem na nízkou vlastní spotřebu energie. Navrhněte obvodové schéma zařízení, jehož součástí budou senzory potřebné k měření enviromentálních veličin a taktéž vyberte vhodný GNSS modul. Navrhněte desku plošných spojů.

Ověřte správnou funkčnost vámi zrealizovaného zařízení. Naprogramujte firmware zařízení tak, aby bylo schopné odesílat následující data: stav baterie, ID zařízení, změnu stavu zařízení (poloha, teplota) a vlastní diagnostiku zařízení. Data by měla být odesílána v pravidelných intervalech a vždy jen při změně polohy a jiných veličin získaných ze sensorů. Provedte podrobné měření jednotlivých parametrů realizovaného zařízení.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HANES, D. IOT fundamentals: networking technologies, protocols, and use cases for the internet of things. 3rd edition. Indianapolis, IN: Cisco Press, 2017. ISBN 978-1-58714-456-1.

[2] FRADEN, J. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4th ed. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-6465-6.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 27.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Erik Herceg

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá vytvořením přenosného GNSS lokátoru pro více použití. Lokátor bude posílat naměřená data pomocí IoT sítě LoRaWAN. Cílem této práce je vytvořit zařízení s nízkým odběrem a s co nejvyšší dobou provozu na akumulátor. Zařízení disponuje senzory enviromentálních veličin.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

IoT technologie, LoRa, LoRaWAN, GNSS, akumulátor, node, gateway

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with construction of portable GNSS locator for multiple uses. This locator will be sending measured data via LoRaWAN IoT network. The aim of this bachelor thesis is to create a device with low current consumption and with highest possible operating time on a battery. The device consists of environmental sensors.

## **KEYWORDS**

IoT technologies, LoRa, LoRaWAN, GNSS, battery, node, gateway



ELIÁŠ, Martin. *Lokalizačný modul pracující v síti IoT.*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2021, 61 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Erik Herceg

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Martin Eliáš  
**VUT ID autora:** 211560  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečné práce:** Lokalizační modul pracující v síti IoT.

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....  
.....  
podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Eriku Hercegovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

# Obsah

|          |                                   |           |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Teoretický úvod</b>            | <b>12</b> |
| 1.1      | IoT technologie a LPWAN           | 12        |
| 1.1.1    | NB-IoT                            | 13        |
| 1.1.2    | Sigfox                            | 14        |
| 1.1.3    | LoRa                              | 15        |
| 1.2      | Princip GNSS                      | 17        |
| 1.3      | Senzory                           | 19        |
| 1.4      | Baterie                           | 19        |
| <b>2</b> | <b>LoRa a LoRaWAN</b>             | <b>23</b> |
| 2.1      | Výběr IoT technologie             | 23        |
| 2.2      | Modulace CSS                      | 24        |
| 2.3      | Definice kanálů a omezení LoRaWAN | 25        |
| 2.4      | Třídy node                        | 26        |
| 2.5      | Aktivace a adresace node          | 27        |
| <b>3</b> | <b>Připojení do sítě LoRaWAN</b>  | <b>28</b> |
| 3.1      | Výběr gateway                     | 28        |
| 3.2      | Nastavení gateway                 | 28        |
| 3.3      | Připojení node do sítě LoRaWAN    | 30        |
| <b>4</b> | <b>Návrh node</b>                 | <b>32</b> |
| 4.1      | Výběr LoRa modulu                 | 32        |
| 4.2      | Výběr GNSS modulu                 | 32        |
| 4.3      | Výběr antén                       | 34        |
| 4.4      | Výběr senzorů                     | 34        |
| 4.4.1    | Vlhkost                           | 36        |
| 4.4.2    | Tlak                              | 36        |
| 4.4.3    | Teplota                           | 36        |
| 4.5      | Výběr napájecího článku           | 37        |
| 4.6      | Nabíjecí obvod akumulátoru        | 38        |
| 4.7      | Napájecí obvod                    | 39        |
| 4.8      | Návrh plošného spoje              | 40        |
| 4.8.1    | Zhotovený výrobek                 | 42        |
| 4.9      | Měření                            | 44        |
| 4.9.1    | Senzor                            | 44        |
| 4.9.2    | LoRa modul                        | 45        |

|                                    |  |           |
|------------------------------------|--|-----------|
| 4.9.3                              | GNSS modul . . . . .                         | 45        |
| 4.9.4                              | Nabíjecí obvod . . . . .                     | 47        |
| 4.10                               | Výpočet doby provozu na akumulátor . . . . . | 47        |
| 4.11                               | Program . . . . .                            | 49        |
| 4.11.1                             | Program koncového zařízení . . . . .         | 49        |
| 4.11.2                             | Dekódování zprávy . . . . .                  | 49        |
| 4.12                               | Vizualizace . . . . .                        | 50        |
| <b>Závěr</b>                       |  | <b>52</b> |
| <b>Seznam použitých zdrojů</b>     |  | <b>54</b> |
| <b>Seznam příloh</b>               |  | <b>59</b> |
| <b>A Složení posílané zprávy</b>   |  | <b>60</b> |
| <b>B Vývojový diagram programu</b> |  | <b>61</b> |

# Seznam obrázků

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Technologie dle dosahu a datové rychlosti . . . . .        | 12 |
| 1.2  | Vizualizace NB-IoT pásma ve spektru. . . . .               | 13 |
| 1.3  | Popis Sigfox pásma ve spektru . . . . .                    | 14 |
| 1.4  | Umístění gateway stanic v TTN síti . . . . .               | 15 |
| 1.5  | Pokrytí sítě CRA . . . . .                                 | 16 |
| 1.6  | Vizualizace určování polohy pomocí 2 a 3 satelitů. . . . . | 18 |
| 1.7  | Porovnání primárních baterií . . . . .                     | 20 |
| 1.8  | Porovnání sekundárních baterií . . . . .                   | 22 |
| 2.1  | Architektura sítě LoRaWAN . . . . .                        | 23 |
| 2.2  | Modulace CSS. . . . .                                      | 24 |
| 2.3  | Třídy node . . . . .                                       | 27 |
| 3.1  | Test připojení k internetu . . . . .                       | 29 |
| 3.2  | Status gateway v TTN . . . . .                             | 30 |
| 3.3  | Zobrazení příchozí zprávy uplink . . . . .                 | 31 |
| 3.4  | Vlastnosti příchozí zprávy uplink . . . . .                | 31 |
| 4.1  | Vybraný senzor BME280 . . . . .                            | 35 |
| 4.2  | Použitý akumulátor 18650HG2 . . . . .                      | 37 |
| 4.3  | Nabíjecí obvod . . . . .                                   | 38 |
| 4.4  | Napájecí obvod . . . . .                                   | 39 |
| 4.5  | 3D model horní strany plošného spoje . . . . .             | 40 |
| 4.6  | 3D model dolní strany plošného spoje . . . . .             | 41 |
| 4.7  | Fotografie horní strany plošného spoje . . . . .           | 42 |
| 4.8  | Fotografie dolní strany plošného spoje . . . . .           | 42 |
| 4.9  | Vnitřní fotografie výrobku . . . . .                       | 43 |
| 4.10 | Vnější fotografie výrobku . . . . .                        | 43 |
| 4.11 | Průběh spotřeby senzoru . . . . .                          | 44 |
| 4.12 | Proudová spotřeba LoRa modulu . . . . .                    | 45 |
| 4.13 | Rozptyl určení polohy . . . . .                            | 46 |
| 4.14 | Proudová spotřeba GNSS modulu . . . . .                    | 46 |
| 4.15 | Vizualizace měřených veličin . . . . .                     | 50 |
| 4.16 | Vizualizace polohy . . . . .                               | 51 |

# Seznam tabulek

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Komerční balíčky služby Sigfox . . . . .                       | 14 |
| 1.2 | Ceník služeb CRA . . . . .                                     | 17 |
| 1.3 | Typické parametry primárních baterií . . . . .                 | 20 |
| 1.4 | Typické parametry sekundárních baterií . . . . .               | 22 |
| 2.1 | Frekvence pro jednotlivé šířky pásma . . . . .                 | 26 |
| 3.1 | Konfigurace a nastavení serveru TTN . . . . .                  | 29 |
| 4.1 | Porovnání LoRa modulů . . . . .                                | 32 |
| 4.2 | Možné kombinace konstelací u modulu NEO-M8N . . . . .          | 33 |
| 4.3 | Časové nároky a horizontální přesnost modulu NEO-M8N . . . . . | 33 |
| 4.4 | Proudová spotřeba modulu NEO-M8N při různých módech . . . . .  | 34 |
| 4.5 | Technické parametry senzoru BME280 . . . . .                   | 35 |
| 4.6 | Technické parametry baterie ER34615 . . . . .                  | 37 |
| 4.7 | Reálná spotřeba senzoru . . . . .                              | 44 |
| 4.8 | Rozložení dat zprávy . . . . .                                 | 47 |

# Úvod

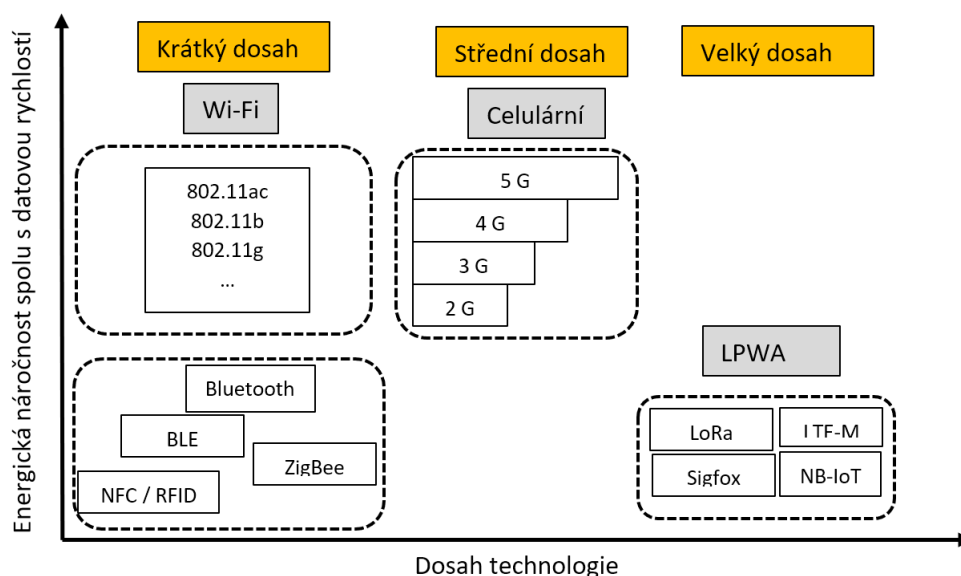
IoT (Internet of Things) je síť zařízení, které si navzájem vyměňují informace. Vyskytuje se v chytré domácnosti, například: elektronické vysavače, elektronické zatahování žaluzií, kontrola trvanlivosti potravin v lednici atd. Další využití IoT sítě nalezneme v projektu Smart City (chytré město), například chytré parkování, odpadkové koše se senzory naplnění. V průmyslu se tato technologie může použít ke kontrole a sledování zboží (balíky na skladě, doprava zásilek apod.) Jedna z klíčových vlastností sítě IoT spočívá v tom, že všechna zařízení jsou připojena k internetu a tím se dá zjišťovat stav zařízení a zároveň ho ovládat. Toto ovládání lze díky dostupnosti internetu provádět téměř odkudkoliv na světě. Jednou z dalších výhod, kterou tato technologie přináší, je snížení potřeby lidské práce, kdy například veřejné odpadkové koše obsahují senzor snímající naplnění, který na základě naplnění upozorní svozové auto, a to vyveze pouze naplněné koše a prázdné vynechá. Práce se stává efektivnější a šetrnější k životnímu prostředí. Vize budoucnosti spočívá právě v této síti, kde každé běžně používané zařízení posílá data na internet, kde se může provádět jejich další zpracování. Aby tato vize byla úspěšná, je potřeba mít infrastrukturu, která umožňuje připojení velkého množství zařízení. V současnosti počet IoT zařízení na světě exponenciálně roste a očekává se, že do roku 2025 bude takových zařízení existovat přibližně 75 miliard. Jednou z důležitých vlastností zařízení je minimální velikost, přenosnost a nízká cena. Proto jsou tato zařízení navržena pro provoz na akumulátor. Bylo by nepraktické ke každé senzorické jednotce vést napájení. To samé platí i pro posílání dat. Data je nejvýhodnější posílat bezdrátově. Z těchto parametrů plyne, že zařízení musí být optimalizované na nízkou spotřebu. Práce je rozdělena na 4 kapitoly. V první kapitole jsou rozebrány tři hlavní IoT technologie patřící do kategorie LPWAN a to NB-IoT, Sigfox a LoRa. Dále je probrán princip GNSS lokalizace polohy a rozdělení baterií s uvedením jejich vlastností. Druhá kapitola se zabývá LoRa modulací a popisem LoRaWAN sítě. Třetí kapitola je věnována praktickému výběru gateway, jejímu nastavení a také připojení node do sítě LoRaWAN. V předposlední kapitole jsou uvedeny jednotlivé komponenty navrhovaného node, a to LoRa modul, GNSS modul, výběr antén, senzoru, akumulátoru, nabíjecí obvod a měnič napětí. Ve čtvrté kapitole nachází návrh plošného spoje a fotografie zhotoveného výrobku. Součástí je také měření jednotlivých spotřeb, rozptyl určení polohy a výpočet doby provozu na akumulátor. Definován je program koncového zařízení a výsledná vizualizace.



# 1 Teoretický úvod

## 1.1 IoT technologie a LPWAN

Při rozhodování mezi možnými technologiemi přenosu si musíme určit naše požadavky: potřebná rychlost přenosu dat, posílaný objem dat, vzdálenost a požadavky na energickou spotřebu. Pokud chceme dosáhnout velkého dosahu a zároveň nízké spotřeby, musejí se udělat kompromisy na úkor velikosti posílaných zpráv, rychlosti jejich přenosu, počtu odesílaných a přijatých zpráv a na rychlosti odezvy. Dosah ovlivňuje také kmitočet, šířka pásma a zvolený typ modulace. Technologie s nízkou spotřebou a velkým dosahem je označována LPWAN (Low Power Wide Area Network). Na Obr. 1.1 je tato kategorie porovnávána s ostatními. Do kategorie spadají technologie LoRa, Sigfox a NB-IoT, které budou více popisovány v následujících kapitolách [1]. LoRa a Sigfox spadají do bezlicenčního pásma ISM (Industrial, Scientific and Medical) pracují v pásmu 868 MHz [2]. ISM pásmo na 868 MHz může využívat široká veřejnost, ale s omezením na vyzařovaný výkon, většinou 14 dBm (25mW) a klíčový poměr (duty cycle) [3]. Tyto pravidla jsou stanovena z toho důvodu, aby pásmo nebylo zahlcené, ale použitelné i pro ostatní uživatele. NB-IoT se nachází v licencovaném pásmu, za které se platí koncesionářské poplatky. Výhodou tohoto pásma je, že ho nemůže využívat nikdo jiný a tím zde nevzniká rušení jako u ISM pásem. Společnost platící za pásmo poskytuje zákazníkům využití pásma a služeb spojených s posíláním dat.



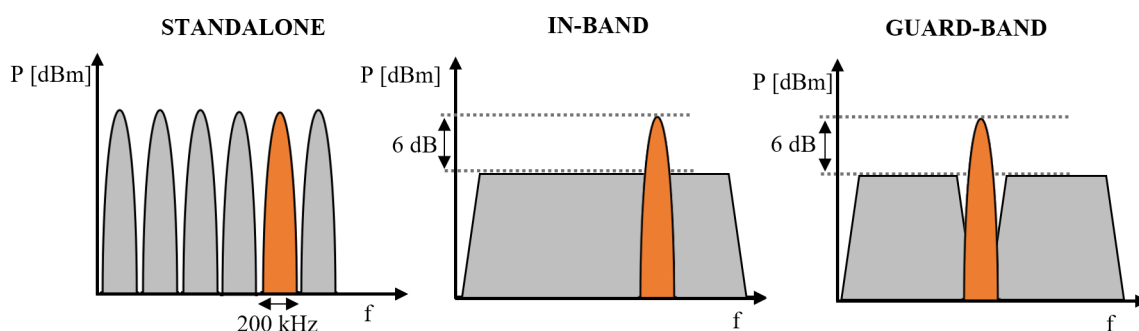
Obr. 1.1: Technologie dle dosahu a datové rychlosti [1]

### 1.1.1 NB-IoT

Standard NB-IoT (Narrowband IoT) je definován partnerským projektem 3GPP. Tuto technologii provozuje v ČR například mobilní operátor Vodafone v licenčním pásmu B20, které definuje šířku pro uplink 832–862 MHz a downlink

791–821 MHz [4]. Výhodou technologie NB-IoT je možnost využití stávající infrastruktury sítě LTE nebo GSM mobilního operátora úpravou programu vysílačů. Možnosti zavedení jsou viz. Obr. 1.2: standalone – samostatně vedle signálu GSM, guard-band – výhodou je implementace NB-IoT do ochranného pásma LTE.

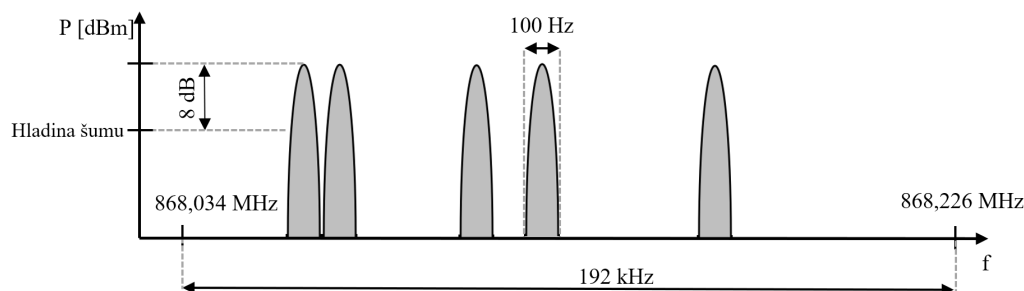
V ochranném pásmu LTE se využívá pásma, za které poskytovatel platí, ale nevyužívá jej. Toto částečně platí i pro in-band, které je přímo v existujícím LTE [5]. Díky úzkému pásmu 200 kHz může LTE a NB-IoT koexistovat a vzájemně se nerušit. Technologie operuje v licenčním pásmu, které není omezeno střídou vysílání jako u ISM, tudíž lze posílat dlouhé řetězce zpráv za sebou a vysílat i na vyšším výkoně 23 dBm. Lze dosáhnout teoretické přenosové rychlosti až 200 kb/s. Nutností je ovšem mít SIM kartu od operátora, například od společnosti Vodafone, která udává téměř 100% pokrytí na území České republiky. Takové pokrytí je způsobeno strategickým umístěním vysílacích stanic (stávající infrastruktura) a vyšším dosahem technologie NB-IoT [6].



Obr. 1.2: Vizualizace NB-IoT pásma ve spektru [5]

### 1.1.2 Sigfox

Sigfox službu poskytuje stejnojmenná firma a je provozována v zemích EU na ISM pásmu 868 MHz. Pásmo není zpoplatněné, ale platí se za využívání sítě. Sigfox využívá ve spektru 192 kHz a každý kanál má šířku 100 Hz. Úzká šířka pásma UNB (Ultra Narrow Band) má výhodu v dobrém rozlišení zprávy od ostatního šumu. Aby byl signál úspěšně přijat, tak přijímaný signál musí být minimálně o 8 dB nad výkonovou úrovní šumu, jak lze vidět na Obr. 1.3 [7].



Obr. 1.3: Popis Sigfox pásma ve spektru [7]

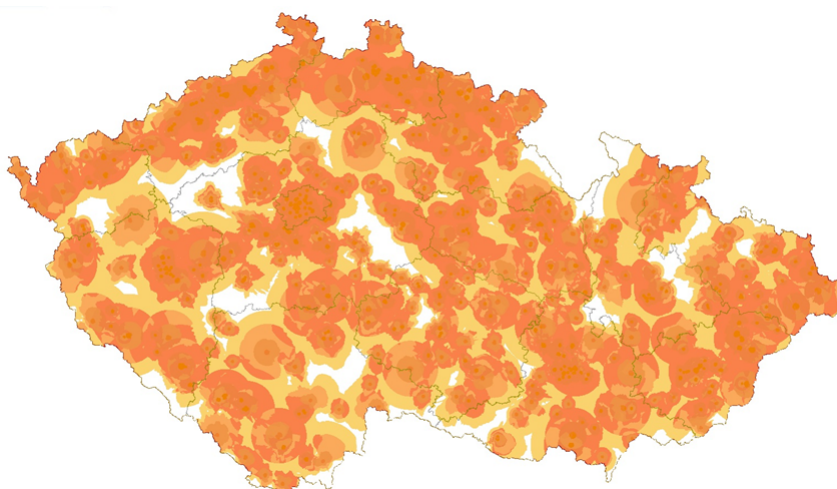
Downlink zprávy se moduluje modulací D-BPSK a uplink G-FSK, rychlost přenosu je 100 b/s. Každá zpráva uplink je vysílána na třech náhodně vybraných frekvenčních pásmech a v časovém odstupu. Tím se zvyšuje šance na úspěšné přijetí v případě, že by například dvě zařízení ve stejný čas vysílala na stejné frekvenci nebo zde bylo rušení. Po 20 sekundách od první vyslané zprávy je 25 sekundové okno pro přijetí downlink. Očekávaný downlink je vždy na frekvenčním pásmu první uplink zprávy. Downlink lze provést vždy až po uplink, z důvodu šetření energie a tím node nemusí neustále naslouchat. V situaci, kdy zprávu přijme více gateway v okolí, tak uplink pošle jen jedna z nich. Uplink má statickou velikost 8 B a downlink maximální velikost 12 B. Aktivace node se provádí přes webové rozhraní, kde se zadá unikátní číslo zařízení [7].

Tab. 1.1: Komerční balíčky služby Sigfox [8]

| Název balíčku              | BASIC      | PLUS    | ULTRA   |
|----------------------------|------------|---------|---------|
| Cena pro 1 zařízení na rok | 140 Kč     | 215 Kč  | 247 Kč  |
| Počet uplink za den        | 2          | 70      | 140     |
| Počet downlink             | 1 za týden | 2 týdně | 4 denně |



gateway nastavit v síti TTN na soukromou. LoRaWAN protokol lze použít i s vlastním serverem. Gateway může přeposílat data na tento server a celá síť tím být naprosto nezávislá. Na mapě pokrytí TTN na Obr. 1.4 jsou modrými značkami vyznačeny gateway, při označení číslem se jedná o jejich počet v dané oblasti. Je zřejmé, že střed velkého města jako například Brna nebo Prahy má velký počet gateway, kvůli vyšší koncentraci obyvatel [11]. V případech, kdy je vyžadováno co největší pokrytí a spolehlivost sítě, lze využít placené sítě v ČR, provozované společností CRA (České Radiokomunikace). Na mapě pokrytí, která je zobrazena na Obr. 1.5 jsou oranžovou barvou vyznačené oblasti s pokrytím. Tmavším odstínem jsou značeny oblasti blízké ke gateway a také oblasti překrytí dosahu více gateway. Pokrytí není dokonalé, ale s postupem času se počet gateway zvyšuje [12].



Obr. 1.5: Pokrytí sítě CRA [12]

V Tab. 1.2 je uveden ceník služeb společnosti CRA.

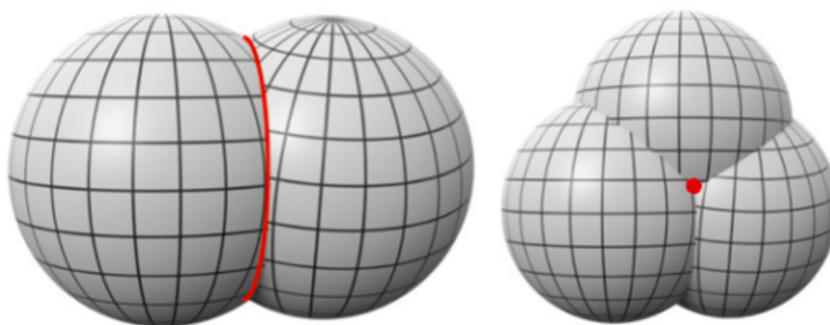
Tab. 1.2: Ceník služeb CRA [13]

| Název balíčku                              | Na zkoušku po dobu 1 měsíce | PILOT     | Individuální   |
|--|-----------------------------|-----------|----------------|
| Počet zařízení připojených v jeden okamžik | až 5                        | až 10     | individuální   |
| Počet uplink za měsíc                      | 1 000                       | 10 000    | individuální   |
| Počet downlink za měsíc                    | 100                         | 1 000     | individuálně   |
| Počet API žádostí za měsíc                 | 1 000 000                   | 1 000     | 1 000 000      |
| Závazek                                    | bez závazků                 | 12 měsíců | min. 12 měsíců |
| Cena za měsíc                              | zdarma                      | 200 Kč    | smluvní        |

## 1.2 Princip GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System) – globální navigační satelitní systém je obecný název, do kterého spadají systémy jako GLONASS, GPS, Galileo a BeiDou. Často se zaměňuje název GNSS s názvem GPS (Global Positioning System), což je jen jeden satelitní systém vlastněný vládou Spojených států. Dále je stručně popsán princip na systému GPS s určováním polohy typu SPS (Standard Positioning Service). Na oběžných drahách Země se nacházejí satelity, které umožňují zjištění polohy. Vysílaný signál satelitu obsahuje C/A kód, P zpřesňující kód a navigační zprávu. P kód je zaheslovaná zpráva pro vojenské použití, díky které lze získat přesnější určení zprávy. C/A kód obsahuje unikátních 1023 bitů, poslání trvá 1 ms a stále se opakuje. Kód je pseudonáhodný a tvoří se předurčeně. Přenos celkové navigační zprávy trvá 12,5 minuty, posílá se rychlostí 50 b/s a obsahuje hodinovou korekci, zdraví satelitu, informace o ionosféře, přesná orbitální data a obecné informace o ostatních satelitech a jejich poloze. Přesnost určování polohy je limitovaná přesností vyslaného C/A signálu a také přesností porovnání s C/A kódem uvnitř přijímače. Ve většině případů je rozlišovací schopnost 1 % šířky bitu, což s přenosovou rychlostí 1023 b/ms a rychlostí šíření přibližně 300000 m/ms je určení polohy na

3 m. U přesnějších přijímačů může být rozlišovací schopnost i 0,6 % neboli přesnost na 1,8 m. Před dalšími operacemi musí mít přijímač synchronizované hodiny se satelitními. Přijímač GPS umí zjistit C/A kód předtím, než je vyslán – kód se chová předurčeně. A při přijímání takového signálu ho porovnává. Přijatý signál je časově posunut. Bitovým porovnáváním dvou signálů se zjistí, o kolik je posunut a z rozdílu je dopočítán časový rozdíl. Při určení vzdálenosti mezi přijímačem a satelitem je vynásoben časový rozdíl s rychlostí šíření přibližně  $3 \cdot 10^8$  m/s. Tím známe jen vzdálenost od 1 satelitu. Poloha přijímače se nachází na ploše koule o poloměru vzdálenosti od satelitu. Při zjištění vzdálenosti od 2 satelitů se poloha přijímače může nacházet na kružnici v průniku kulových ploch. Při znalosti vzdálenosti od 3 satelitů jsou průniky kulových ploch jen 2 body. Uvedené lze vidět na Obr. 1.6. GPS používá i souřadnici středu Země a tím se dá poloha jednoho bodu vyřadit s tím, že se nachází mimo zemskou atmosféru. [14] Minimální počet viditelných satelitů pro určení polohy jsou 4, protože jsou potřeba 4 satelity pro přesnou synchronizaci hodin přijímače. Pomocí GNSS se dá zjistit poloha, přesný čas i rychlost pohybu přijímače. Rychlost se neurčuje ze změny polohy vypočítané ze vzdáleností od satelitů, ale pomocí Dopplerova jevu. Při pohybu se mění přijímaná frekvence signálu, při přibližování se zvyšuje frekvence a při vzdalování klesá. Přesnost určení polohy nemá vliv na určení rychlosti [14]. Signál satelitů má nízkou úroveň, která je pod hranicí teplotního šumu, ale pomocí autokorelačních algoritmů ho lze získat [15]. Satelitní signál špatně prostupuje objekty, pro určení polohy jsou potřeba minimálně 4 satelity, takže je nutná přímá viditelnost na oblohu s celkem širokou plochou [14].



Obr. 1.6: Vizualizace určování polohy pomocí 2 a 3 satelitů [14]

## 1.3 Senzory

Jedním z cílů práce bylo změřit enviromentální veličiny. Jednou z veličin, kterou bylo nutné měřit byla vlhkost vzduchu. Vlhkost vzduchu je velmi důležité kontrolovat uvnitř zařízení, protože může způsobit korozi, která způsobí poruchovost nebo úplné znefunkčnění zařízení. Koroze může způsobit přerušení signálových cest, vytvářet parazitní kapacity nebo zvyšovat sériový odpor spojení. V zařízení je proto kritická na elektrické spoje a baterii, kde může způsobit vytečení nebo zvyšování přechodového odporu baterie. Další měřenou veličinou je teplota, která může negativně ovlivňovat napětí baterie a tlak, z kterého lze určit nadmořská výška.

## 1.4 Baterie

Výběr baterie není vždy jednoduchou záležitostí. Pro každé použití vyhovuje jiný typ baterie. Než je možné baterii vybrat, musí být známa přesná aplikace a požadavky. Pro využití v této bakalářské práci jsou kladeny následující nároky: co nejvyšší možná kapacita v poměru s její velikostí, dimenzováno pro nízký odběr přibližně do 50 mA a pro nízké proudové špičky, rozsah teploty vhodné aplikace pro venkovní použití, tedy minimální rozsah teplot  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , minimální samovybíjení nejvýše do jednotek procent kapacity za rok. Operační logika zařízení je 3,3 V, tím se musí napětí akumulátoru pohybovat v rozmezí 5 V až 2 V. Velké napěťové rozdíly by způsobovaly při konverzi napětí výkonové ztráty, které by snižovalo dobu provozu. Rozhodování mezi primárním článkem (baterií na jedno použití) nebo sekundárním článkem (je možné opakovaně nabíjet) není úplně tak jasné. Pro každou aplikaci a přístup je řešení rozdílné.

### Primární

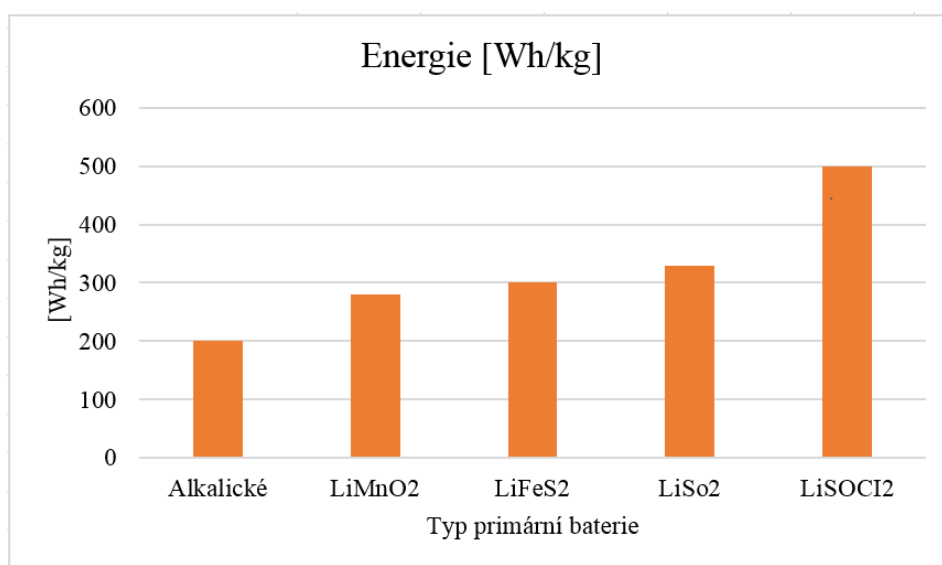
Jak už bylo zmíněno, jedná se o nenabíjecí typ. Postupem moderních technologií se primární baterie zdají běžným uživatelům zastaralé. Tento typ baterií má ale stále své výhody v případech, kdy je nabíjení zařízení nemožné nebo nepraktické, například u kardiostimulátoru nebo při použití v dálkovém ovládání. Primární baterie mají vyšší kapacitu v poměru na hmotnost a objem než sekundární. Alkalické baterie patří mezi nejpoužívanější, jsou však vhodné pro nízké odběry, jejich kapacita je určována při odebírání proudu v desítkách mA. Při vyšších proudech jako 1 C jsou nepoužitelné, jejich kapacita by se pohybovala kolem  $\frac{1}{4}$  udávané. To prezentuje, že při nízkém odebírání proudu se méně projevuje vnitřní odpor baterie. Alkalické, Li-FeS<sub>2</sub> i baterie na složení LiSo<sub>2</sub> mají nízké nominální napětí, tudíž by bylo problematické využití celkové kapacity, jak lze vidět v Tab. 1.3 [17].



Baterie na složení  $\text{LiSOCl}_2$  patří mezi nejnovější technologie, výkon se pohybuje kolem 500 Wh/kg, porovnání s ostatními druhy viz. Obr. 1.7. Využitelná je pouze pro nízké proudy a teplotní rozsah vyhovuje požadavkům, jedná se tedy o ideální volbu [17].

Tab. 1.3: Typické parametry primárních baterií [17]

| Typ primární baterie  | Alkalické | $\text{LiFeS}_2$ | $\text{LiSOCl}_2$ | $\text{LiMnO}_2$ | $\text{LiSo}_2$ |
|-----------------------|-----------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Energie [Wh/kg]       | 200       | až 300           | 500               | 280              | 330             |
| Napětí článku [V]     | 1,5       | 1,5              | 3,6 až 3,9        | 3 až 3,3         | 2,8             |
| Životnost [roky]      | 10        | 15               | 10 až 20          | 10 až 20         | 5 až 10         |
| Provozní teplota [°C] | 0 až 60   | 0 až 60          | -55 až 85         | -30 až 60        | -54 až 71       |



Obr. 1.7: Porovnání primárních baterií [17]

## Sekundární

Sekundární baterie neboli akumulátor je typ článku, který lze opakovaně vybíjet a nabíjet. To je jejich velká výhoda. S touto výhodou přichází i mnoho aspektů, které u primárních článků nebylo potřeba řešit. Životnost článku se udává v cyklech, kde cyklus znamená nabití a vybití. V Tab. 1.4 je počet cyklů udáván pro 80 % DoD – dept of discharge, tedy hloubka vybití plně nabitého článku. Při vyšších procentech vybití klesá rychleji životnost akumulátoru, je to tedy negativní aspekt při využití většího množství energie. Pro nabíjení a vybíjení jsou stanovena koncová napětí. Nabíjení u Li-ion článku je ukončeno typicky napětím 4,2 V při odběru do 50 mA [18] .

Olověné akumulátory mají nejnižší energii vztaženou na kilogram (ze zde probíraných typů), avšak svoje uplatnění mají díky jiným vlastnostem, například v automobilech nebo záložních zdrojích. Jedna z vlastností, pro které se tento akumulátor používá je vysoká odolnost proti zkratu, přebíjení nebo možnost dodat vysoký proud. Mají i mnoho svých nevýhod jako sulface elektrod při nízkém napětí, vysoká hmotnost nebo také enviromentální zátěž z důvodu složení z olova a kyseliny sírové [19]. Nikl-kadmium články oproti olověným mají vyšší energii na kilogram a dají se rychleji nabíjet. Mají nižší napětí na článek 1,2 V, proto se stejně jako olověné spojují sériově pro dosažení většího napětí. Jejich velkou nevýhodou je vysoké samovybíjení, přibližně 20 % kapacity za měsíc. Mohou být ale skladovány ve vybitém stavu. Jinak je vlastnostmi podobná olověné [18].

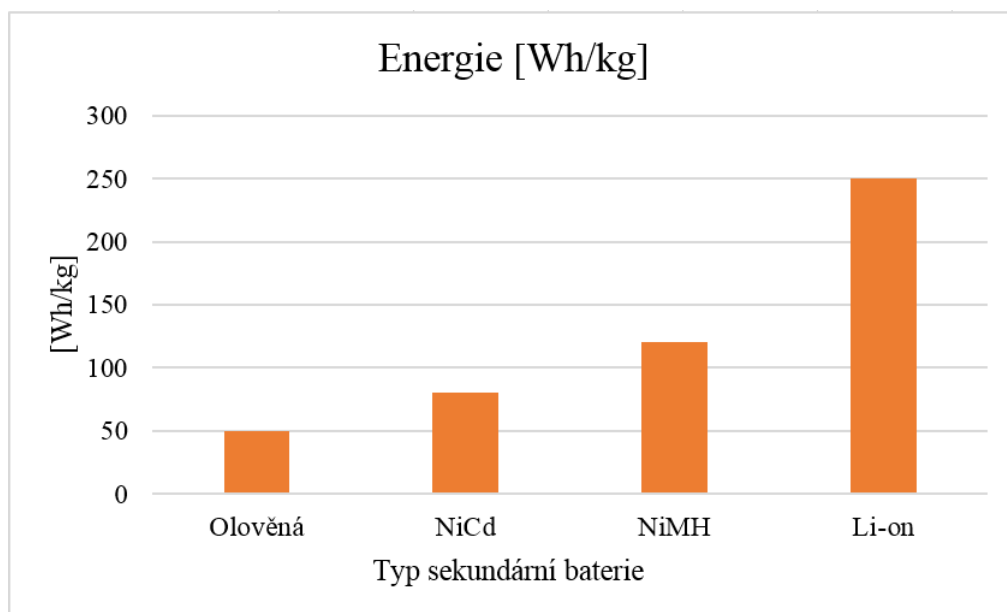
Technologie NiMH už dosahuje vyšších kapacit, ale stejně jako u článků NiCd je zde problém samovybíjení přibližně 30 % za měsíc a nízké napětí článku. NiMH i NiCd by se měly každých 90 dní plně nabít a plně vybit z důvodu paměťového efektu. Paměťový efekt nastává při neúplném vybití a následném nabití, kde si článek "pamatuje" předchozí dodanou energii. Tento efekt by neměl být problém v daném použití, kde by článek byl plně nabit a plně vybit [18].

Li-ion akumulátory – tedy zde obecně označena kategorie, do které spadají i všechny typy složené na bázi Li-ion s různými složeními a příměsemi jako kobalt a magnezium. Při hledání v produktových listech obchodníci v drtivé většině neuvádí konkrétní složení akumulátoru, proto by zde konkrétní popis ztrácel význam. Technologie dosahuje nejvyšších kapacit, přibližně 250 Wh/kg, přesto je kapacita poloviční oproti technologii primární baterie LiSOCl<sub>2</sub> s kapacitou 500 Wh/kg. Li-ion články mají nejvyšší napětí na článek – při plném nabití 4,2 V a při vybití 2,5 V, což je ideální pro použití v této práci. Samovybíjení by mělo činit méně než 5 % kapacity měsíčně, což je vhodné pro dlouhou výdrž na jedno nabití. Lze odebírat i vysoké špičkové a kontinuální proudy.

Ze zmíněných technologií bezkompromisně vyhrává tato technologie, která je v porovnání s ostatními nejvýhodnější, viz. Tab. 1.4 a Obr. 1.8.

Tab. 1.4: Typické parametry sekundárních baterií [18]

| Typ sekundárního článku        | Olověná    | NiCd      | NiMH       | Li-ion       |
|--------------------------------|------------|-----------|------------|--------------|
| Energie [Wh/kg]                | 50         | 80        | 120        | 250          |
| Napětí článku [V]              | 2          | 1,2       | 1,2        | 3,6          |
| Životnost v cyklech (80 % DoD) | 200 až 300 | 1 000     | 300 až 500 | 500 až 1 000 |
| Provozní teplota [°C]          | -20 až 50  | -20 až 65 | -20 až 65  | -20 až 60    |
| Konec vybíjení [V]             | 1,75       | 1         | 1          | 2,5          |

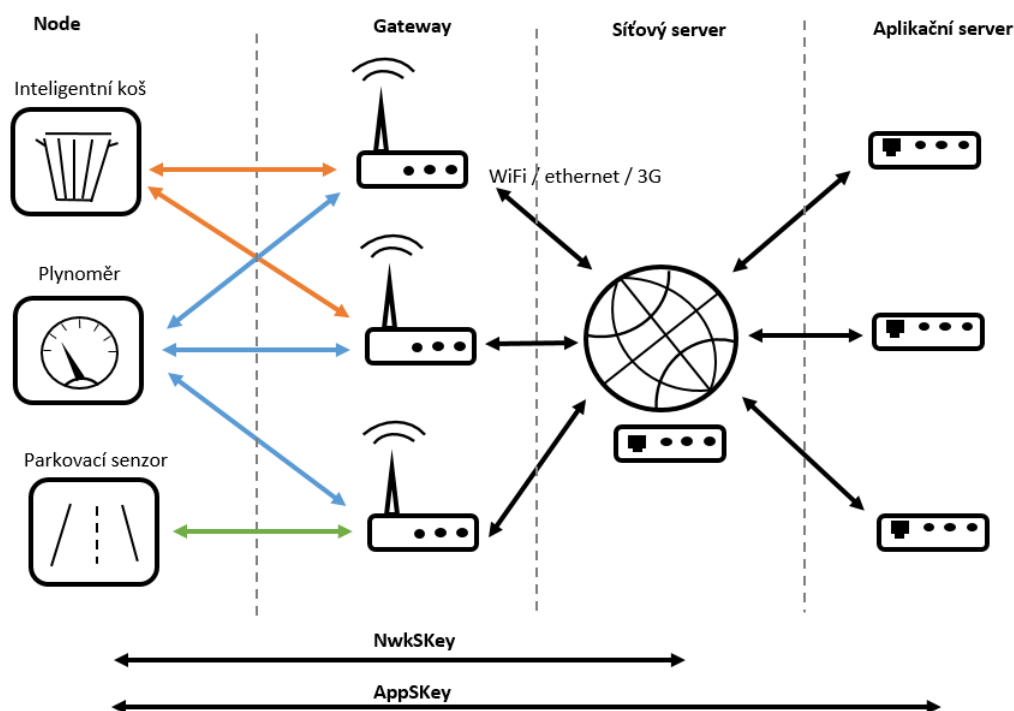


Obr. 1.8: Porovnání sekundárních baterií [18]

## 2 LoRa a LoRaWAN

### 2.1 Výběr IoT technologie

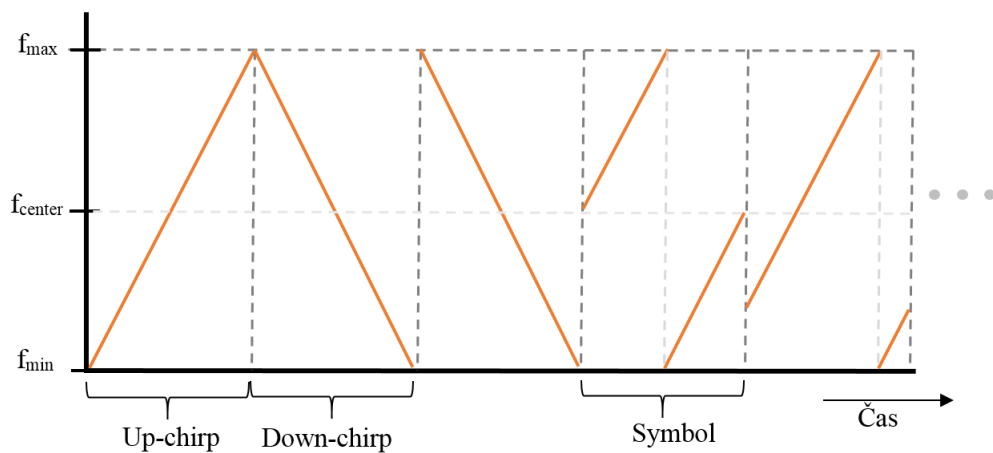
Ze zmíněných sítí LoRaWAN, NB-IoT a Sigfox byla vybrána síť LoRaWAN. Jak už plyne z předchozích kapitol, kde tyto technologie byly popisovány jednotlivě, tak jako jediná umožňuje použití bez poplatků. Při zachování konstrukce koncového zařízení lze využít placenou síť CRA nebo bezpoplatkovou síť TTN. Lze provozovat vlastní gateway v soukromém módu bez připojení ostatních nebo provozovat gateway ve veřejném módu. V případě obou variant je možnost vlastního aplikačního serveru. Další variantou může být jen komunikace mezi dvěma zařízeními bez existence sítě LoRaWAN – pouze LoRa modulace. Nejvíce zajímavá je možnost provozovat vlastní gateway a mimo jiné tím i přispět do komunity TTN. Při provozování vlastní gateway je možnost experimentů s nastavením, které by jinak nebylo možné realizovat.



Obr. 2.1: Architektura sítě LoRaWAN [10]

Mezi node (koncové zařízení) a gateway (zprostředkovávací stanice) je hvězdicová topologie zobrazená na obrázku 2.1. Topologie funguje na principu, kde jednotlivé node nekomunikují mezi sebou přímo, ale každý signál přijímá gateway. Nevýhodou je, že při poruše na gateway se signál nepřijme a i při funkčnosti všech node síť nebude funkční. Signál vyslaný node musí přijmout minimálně jedna gateway. Přijatou zprávu gateway přepoše na síťový server přes ethernet, WiFi nebo při umístění, kde je to příliš nákladné nebo nevhodné lze použít 3G síť s připojením přes SIM kartu. Při přijmutí zprávy několika gateway se duplicitní zprávy v síťovém serveru vymažou. Topologie sítě mesh se v ojedinělých případech také využívá, avšak je mnohem náročnější na spotřebu z důvodu přeposílání zprávy mezi jednotlivými node. Mezi node a gateway probíhá komunikace na modulaci LoRa s protokolem LoRaWAN. Tato komunikace probíhá asynchronně na principu ALOHA (náhodný přístup), není tedy potřeba pravidelná synchronizace mezi node a gateway. Jednoduše, když node vyšle zprávu, tak gateway vždy přijímá. Systém má výhodu v několikanásobně nižší spotřebě, kde se může node vždy jen vzbudit ze spánkového režimu a vyslat zprávu. Síťový server se stará o mazání duplicitních zpráv, směrování zpráv uplink a downlink a také rozhoduje, která gateway zprávu odešle a určuje směrování k danému aplikačnímu serveru. Aplikační server poskytuje webové rozhraní pro uživatele [10].

## 2.2 Modulace CSS



Obr. 2.2: Modulace CSS [20]

LoRa modulace pracuje na principu CSS (Chirp Spread Spectrum) modulace rozprostřeného spektra ve fyzické vrstvě sítě. Přenášená informace je posílána ve

změnách frekvence. Používá se zde lineární změna frekvence. Pro informování přijímače, že bude zahájeno vysílání se vyšle série lineárně se zvyšujících se úseků od  $f_{\min}$  po  $f_{\max}$ . Takový úsek se označuje up-chirp a v opačném případě, když se frekvence snižuje od  $f_{\max}$  do  $f_{\min}$  se nazývá úsek down-chirp, vyobrazeno na Obr. 2.2. Posloupností up-chirp a down-chirp se informuje přijímač, že bude vyslána zpráva, na jaké frekvenci a jaké bude využívané pásmo. Vysílání tedy zabírá šířku pásma  $f_{\max} - f_{\min}$ . Symbol je kódovaná hodnota. Kódovaná hodnota symbolu může mít od 7 bitů až po 12. Počet bitů v symbolu se označuje jako SF neboli rozprostírací faktor. To znamená, že symbol obsahuje  $2^{SF}$  úrovní, tyto úrovně se označují jako chips. V časovém měřítku například při  $SF = 7$  by byla hodnota 64 zakódovaná jako první symbol zleva na Obr. 2.2, kde začíná na  $f_{\text{center}}$ . Kódovaná hodnota se tedy projeví na frekvenci, od které roste, až po  $f_{\max}$  a následně začíná lineárně růst od  $f_{\min}$  do konce doby symbolu. Symbol stejně jako up-chirp a down-chirp má stejnou dobu trvání, která je určena rozprostíracím faktorem a šířkou pásma, kterou lze vypočítat pomocí Vzorce 2.1. Jak je vidno ze zmíněného vzorce, čím vyšší je rozprostírací faktor SF, tím se zvyšuje doba trvání [20].

$$T[s] = \frac{2^{SF}}{B} \quad (2.1)$$

U zařízení, kde nám jde především o spotřebu, se snažíme mít co nejkratší dobu přenosu celkové zprávy - co nejnižší hodnotu SF. Potýkáme se zde ale s problémem, že čím nižší je SF, tak tím více je zpráva náchylná na okolní rušení a tím i v podstatě omezuje vzdálenost na jakou jde signál správně přijmout a rozlišit jednotlivé chips. Například oproti modulaci FSK, CSS modulace nevyužívá svoje pásmo tak efektivně, ale má mnohem lepší dekodovatelnost, až 20 dB pod úrovní šumu [20].

## 2.3 Definice kanálů a omezení LoRaWAN

Jak už bylo zmiňováno, tak LoRa operuje v ISM pásmu. Na tomto pásmu jsou omezení na vyzařovaný výkon a na dobu vysílání, která se specifikuje v procentech a označuje se jako střída (duty cycle). Pro LoRaWAN v zemích EU jsou definovány kanály zobrazené v Tab. 2.1[22]. Těchto komunikačních kanálů je celkem 9, kde mohou najednou probíhat komunikace na různých SF. LoRa modulace spadá do pásma 863 MHz až 870 MHz, takže podle českého telekomunikačního úřadu (ČTÚ) je zde povolená maximální střída 1 % [3]. Vyšší omezení je ale ze strany serveru TTN, který byl vybrán. Ze strany TTN je omezení pro veřejné gateway na uplink 30 sekund a 10 downlink zpráv pro jeden node za 24 h [23]. Pro soukromé sítě tyto omezení neplatí a jediným omezením jsou lokální pravidla. V obou případech je potřeba brát ohled na ostatní uživatele a udržet tak toto pásmo použitelné. Je to také důležité při

zohledňování nízké spotřeby, kde se snažíme využívat co nejnižší SF a co nejkratší zprávy.

Tab. 2.1: Frekvence pro jednotlivé šířky pásma [22]

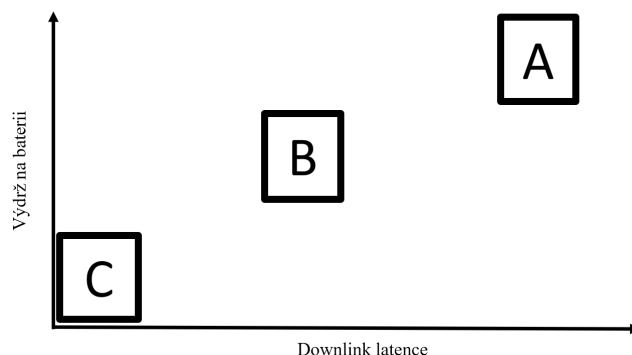
| Frekvence [MHz] | Poznámka   |
|-----------------|--|
| 868.1           | SF7 až SF12, pásmo 125 kHz                         |
| 868.3           | SF7 až SF12, pásmo 125 kHz                         |
| 868.5           | SF7 až SF12, pásmo 125 kHz                         |
| 867.1           | SF7 až SF12, pásmo 125 kHz                         |
| 867.3           | SF7 až SF12, pásmo 125 kHz + SF7 při pásmu 250 kHz |
| 867.5           | SF7 až SF12, pásmo 125 kHz                         |
| 867.7           | SF7 až SF12, pásmu 125 kHz                         |
| 867.9           | SF7 až SF12, pásmu 125 kHz                         |
| 868.8           | FSK modulace                                       |

Při volbě SF je nutné pamatovat, že při zvýšení SF o 1 se zvýší doba přenosu zprávy dvojnásobně. Pro zjištění, jak dlouho bude trvat poslání zprávy (airtime) při různých SF je velmi užitečný online kalkulačtor [24]. Do kalkulačtoru stačí zadat velikost posílané zprávy (payload size) a velikost hlavičky (overhead size), která je pro LoRaWAN protokol 13 B.

## 2.4 Třídy node

Na Obr. 2.3 je uvedeno rozdělení node do několika tříd v závislosti na typu komunikování s gateway. U třídy typu A probíhá komunikace asynchronně - přístup ALOHA. Node má po každé vyslané zprávě uplink vyhrazené 2 intervaly, kdy gateway může a nemusí vyslat zprávu downlink. Zpráva downlink se vyšle pouze pokud je nějaká připravena na odeslání v aplikačním serveru. Komunikace většinou probíhá bez záruky na doručení, lze si vyžádat zprávu o potvrzení, ale například při omezení TTN se takové zprávy počítají do downlink, kterých může být za 24 hodin jen 10. Uvedená třída je nejméně náročná na spotřebu - zařízení se může vždy jen vzbudit ze spánkového režimu, vyslat zprávu a znovu přejít do spánku. Nevýhodou je, že právě zprávy downlink může node přijmout až po uplink, tudíž je zde jisté omezení. Třída B má navíc oproti třídě A plánovaná okna pro uplink. Z gateway dostává synchronizační zprávy, kterými se tyto okna pro přijímání synchronizují. Tato třída má nižší latenci, ale za cenu menší výdrže na baterii, viz. Obr. 2.3[10]. Třída zařízení

C má neustále otevřené okno pro downlink, které zavírá pouze při uplink. Je zde tedy naprosto nejnižší latence, které lze dosáhnout. Nízká latence je ale za cenu, že taková třída je nevhodná pro provoz na baterii [10].



Obr. 2.3: Třídy node [10]

## 2.5 Aktivace a adresace node

Aktivace ABP (Activation By Personalization) – tento typ aktivace vyžaduje přímá zadání relačních klíčů NwkSKey a AppSKey. Uvedené klíče jsou většinou pevně zapsány v paměti node. Tímto způsobem jsou spjaty se síťovým serverem a k dané aktivaci. Pro adresaci node se používá DevAddr (Device Address) - adresa zařízení. Výhodou je, že pro aktivaci není potřeba downlink od gateway. Je tu však bezpečnostní riziko, kde relační klíče zůstávají stejné a nastává zde možnost dešifrování. Aktivace OTAA (Over The Air Activation) – je upřednostňovaná forma autorizace v LoRaWAN síti. Klíče NwkSKey a AppSKey jsou při připojení přiřazeny síti LoRaWAN, klíče jsou dynamické a při každém připojení se mění. Z toho důvodu se jedná o více zabezpečené připojení než ABP. Není však vhodné tuto autorizaci, a tedy i generování nových relačních klíčů, provádět často. Každá aktivace zaměstnává gateway tím, že musí vyslat downlink. Oproti ABP je možné měnit síťový server. Pro tento typ aktivace je potřeba klíčů DevEUI, AppEUI a AppKey [25].



## 3 Připojení do sítě LoRaWAN

### 3.1 Výběr gateway

Jedno z hlavních dělení gateway je podle počtu komunikačních kanálů. Počet komunikačních kanálů může být celkem 8 – při vynechání speciálního kanálu pro FSK modulaci. Obecně je nejlepší, aby gateway pracovala na co nejvíce kanálech a tím mohla přijímat signál od co nejvíce node. Není vhodné provozovat síť node, která používá stejný komunikační kanál. Například na stránkách TTN přímo uvádějí, že jednokanálové gateway jsou dostačující na základní experimenty, ale jinak jejich používání nedoporučují a ani je v mapě gateway neuvádí [26]. Jak pro uživatele, tak pro případnou komunitu, která by gateway využívala, je jednokanálová gateway nevhodná. Nicméně se dají najít i zajímavé projekty, kde gateway tvoří pouze LoRa modul s připojením k internetu přes WiFi modul ESP. Trochu zajímavější jsou dvoukanálové gateway, ale pro plné nasazení je dobré zainvestovat do 8 kanálové.

V dřívější době bylo výhodnější si gateway postavit než koupit [27]. Stavěli se nejčastěji ve spojení malého počítače Raspberry-pi s některým z modulů typu RAK831 [28] nebo iC880A [29]. Při sečtení celkových nákladů je aktuálně cenově nejvýhodnější si koupit sériově vyráběnou gateway.

Na výběr bylo nepřehledné množství variant. Ve finálním výběru bylo rozhodováno mezi wAP-LR8-kit od firmy MikroTik a LPS8 od firmy Dragino. Parametry jsou si podobné. Cenově je výhodnější LPS8, ale má horší dokumentaci, je pouze pro vnitřní instalaci a neumožňuje tak pokročilá nastavení jako wAP-LR8-kit. Byla tedy vybrána gateway od firmy MikroTik [30].

### 3.2 Nastavení gateway

Gateway obsahuje interní anténu v provedení na plošném spoji se ziskem 2 dBi. Tato anténa je vhodná jen pro vnitřní použití, pro lepší dosah je možné externě přes SMA konektor připojit jinou. Při dodání je konektor interní antény odpojen a je nutné krabičku otevřít a připojit ji, jinak hrozí odraz signálu a poškození. Po zapnutí je gateway v módu WiFi Access Point, připojit se dá pouze přes Wifi. Do nastavení se lze dostat třemi způsoby - přes webový prohlížeč po zadání IP adresy 192.168.88.1, přes program WinBox, který automaticky detekuje gateway a přes mobilní aplikaci MikroTik. Pro všechny přístupy je prostředí totožné.

Konfigurace připojení k internetu je v módu WiFi as a station, gateway je tedy připojená k existující WiFi síti. Při připojování k jiné WiFi síti je velmi užitečná funkce bezpečný mód (safe mode). Během přepojení sítě dojde k odpojení od stávající a pokud bylo heslo nebo jméno sítě, do které se připojuje, zadáno špatně, tak bude

gateway nedostupná. Pro zabránění takového zablokování stačí aktivovat funkci safe mode a při špatném nastavení se obnoví do předchozího. Pro ověření správného nastavení se dá do terminálu v gateway napsat příkaz ping k některému internetovému serveru [31]. Odpověď serveru při správném nastavení je vidět na Obr. 3.1.

```
[admin@MikroTik] > ping www.google.com
  SEQ HOST                                SIZE TTL TIME  STATUS
    0 172.217.23.228                      56  56 28ms
    1 172.217.23.228                      56  56 23ms
    2 172.217.23.228                      56  56 20ms
    3 172.217.23.228                      56  56 20ms
    4 172.217.23.228                      56  56 26ms
    5 172.217.23.228                      56  56 23ms
    6 172.217.23.228                      56  56 22ms
```

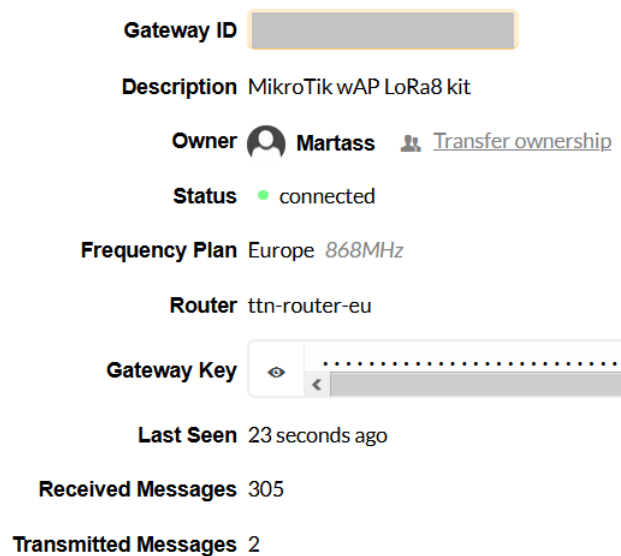
Obr. 3.1: Test připojení k internetu

Konfigurace LoRaWAN v gateway s nastavením serveru TTN byla nastavena podle Tab. 3.1. Na stránce TTN je nutné vytvořit účet a zaregistrovat gateway. Je zde možné určit polohu, nadmořskou výšku a ostatní parametry, které jsou užitečné i pro ostatní uživatele. Pro adresaci gateway je potřeba vložit unikátní gateway ID.

Tab. 3.1: Konfigurace a nastavení serveru TTN

| Status       | enabled   |
|--------------|---|
| Name         | libovolné   |
| Gateway ID   | hardware ID nebo vygenerovat jiné                                   |
| Channel plan | EU 868  |
| Antenna gain | 2   |
| Forward      | valid end error   |
| Network      | public  |
| Server       | router.eu.thethings.network<br>Up port = 1 700<br>Down port = 1 700 |

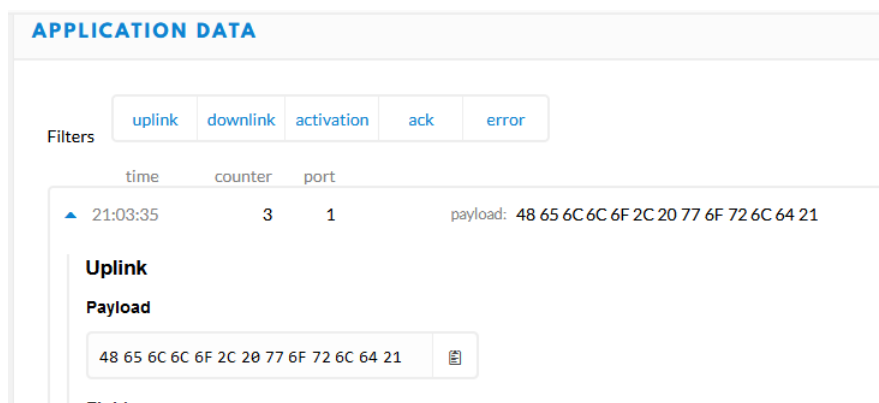
V případě správného nastavení je status gateway connected. Lze vidět v konzoli na stránce TTN, viz. Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Status gateway v TTN

### 3.3 Připojení node do sítě LoRaWAN

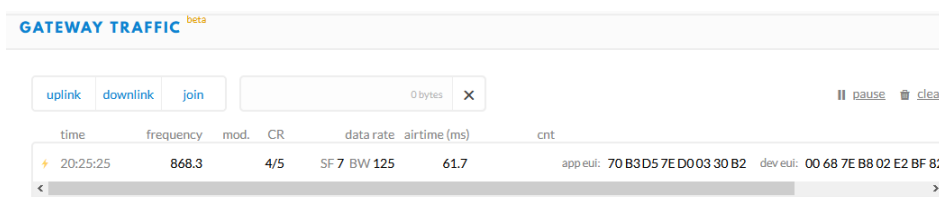
Pro připojení do sítě a otestování funkčnosti vybraného LoRa modulu, byla použita vývojová deska s procesorem STM32F103C8T6. Pro implementaci LoRaWAN byla použita knihovna LMIC – LoRa Mac In C, tato knihovna byla vyvinuta firmou IBM a aktuálně je spravovaná komunitou. V knihovně jsou i programové příklady. Byl využit program pro mód zařízení A s autorizací OTAA. Nejprve je nutné vytvořit novou aplikaci v konzoli TTN. Do této aplikace se musí zaregistrovat daný node. V aplikaci se musely vygenerovat klíče DevEUI, AppEUI a DevAdd, Tyto klíče se následně museli vložit do programu. Důležité je dbát v jakém formátu klíče jsou, v tomto příkladu jsou AppEUI a DevEUI ve formátu LSB a AppKey v MSB. Při testování jsem zadal ve špatném formátu AppKey a potom se zobrazovala zpráva v záložce zařízení a v aplikaci ne. Po zapnutí node se provedla autorizace OTAA a byla poslána zpráva „Hello, world!“. Zpráva byla poslána v ASCII kódu.



Obr. 3.3: Zobrazení příchozí zprávy uplink

V aplikaci na Obr. 3.3 je vidět příchozí zpráva uplink. Tato zpráva po přeložení z ASCII je stejná jako poslaná, tedy komunikace funguje správně.

Lze si i zobrazit na jaké frekvenci byla zpráva poslána, na jakém SF a s jakou šířkou pásma, všechny tyto údaje odpovídají nastaveným. Je tu i zobrazená doba přenosu, posílaná zpráva měla velikost 13 B a velikost hlavičky je 13 B. Při výpočtu pomocí kalkulačky [24] vyšla na SF7 při pásmu 125 kHz doba přenosu 61,7 ms, viz. Obr. 3.4. Tato vypočtená doba přesně odpovídá reálné době přenosu.



Obr. 3.4: Vlastnosti příchozí zprávy uplink

## 4 Návrh node

### 4.1 Výběr LoRa modulu

Při výběru bylo rozhodováno mezi modulem RN2483 od firmy Microchip a RFM95W od firmy Hoperf. V Tab. 4.1 je srovnání spotřeby a jejich rozměrů. RFM95W [32] má nižší spotřebu v TX módu, ale při nižším výkonu. Rozměrově je větší RN2483 [33] a podporuje LoRaWAN protokol. Rozhodnuto bylo pro RFM95W, hlavním rozhodovacím faktorem byla téměř třetinová cena. Modul podporuje pouze LoRa modulaci, LoRaWAN protokol musí probíhat na řídicím procesoru.

Tab. 4.1: Porovnání LoRa modulů

|                       | <b>RFM95W</b> | <b>RN2483</b> |
|-----------------------|---------------|---------------|
| Proud při TX [mA]     | 29            | 38            |
| Při výkonu [dBm]      | 13            | 13,5          |
| Proud při RX [mA]     | 12,1          | -             |
| Proud při spánku [uA] | 0,2           | 1,6           |
| LoRaWAN protokol      | NE            | ANO           |
| Rozměry [mm]          | 16 x 16       | 17,8 x 26,7   |

### 4.2 Výběr GNSS modulu

Byl zvolen modul NEO-M8N od firmy U-blox, která vyrábí modulární GNSS přijímače. Modul je tvořen plošným spojem, na kterém jsou osazené součástky malých velikostí, které by bylo jinak obtížné ručně osazovat. Součástky jsou zakryty plechovou krytkou, aby se snížilo elektromagnetické rušení. Modulární konstrukce a nutnost minimálního počtu externích komponent snižuje pravděpodobnost chyb v návrhu. Modul je zpětně kompatibilní s předchozími verzemi NEO-7, NEO-6 a NEO-5, to dává možnost použití jiného modulu při zachování návrhu plošného spoje. NEO-8 může přijímat až 3 konstelační systémy GNSS zároveň, možnosti nastavení jsou uvedeny v Tab. 4.2. Jednotlivé řádky určují, jaké systémy mohou být využívány zároveň. Modul starší řady NEO-7 měl na výběr buď přijímání GPS/QZSS nebo GLONASS - není možnost využívat obou systémů zároveň. Modul ještě nižší řady NEO-6 může využívat jen konstelace GPS. Využitím většího počtu GNSS systémů se zvyšuje pravděpodobnost, že i při zhoršeném výhledu na oblohu přijmeme signál z dostatečného počtu satelitů [34].

Tab. 4.2: Možné kombinace konstelací u modulu NEO-M8N

| GPS | Galileo | GLONASS | BeiDou |
|-----|---------|---------|--------|
| ANO | ANO     | -       | -      |
| ANO | ANO     | ANO     | -      |
| ANO | ANO     | -       | -      |
| ANO | -       | ANO     | -      |
| ANO | -       | -       | ANO    |
| -   | ANO     | ANO     | -      |
| -   | ANO     | -       | ANO    |
| -   | -       | ANO     | ANO    |

Napájecí napětí modulu se může pohybovat v rozmezí 2,7 V až 3,6 V a provozní teplota je -40 °C až +85 °C, rozměry modulu jsou 16 x 12,2 mm. Tab. 4.3 obsahuje dosažitelnou přesnost určení polohy a její časové nároky. Tab. 4.4 ukazuje přibližnou průměrnou spotřebu při různých módech [34].

Tab. 4.3: Časové nároky a horizontální přesnost modulu NEO-M8N

|                                   |                       | GPS a<br>GLONASS | GPS | GLONASS | BeiDou | Galileo |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------|-----|---------|--------|---------|
| <b>Horizontální přesnost [m]</b>  |                       | 2,5              | 2,5 | 4       | 3      | -       |
| Čas do první<br>určení polohy [s] | Studený start         | 26               | 29  | 30      | 34     | 45      |
|                                   | Teplý start           | 1                | 1   | 1       | 1      | 1       |
|                                   | Pohotovostní<br>režim | 2                | 2   | 2       | 3      | 7       |

Tab. 4.4: Proudová spotřeba modulu NEO-M8N při různých módech

|   | GPS a GLONASS | GPS |
|---|---------------|-----|
| Získávání polohy (Acquisition) [mA]             | 32            | 25  |
| Nepřetržitý mód (Continuous mode)[mA]           | 30            | 23  |
| Nízko spotřebový mód 1 Hz (Power save mode)[mA] | 13            | 12  |

### 4.3 Výběr antén

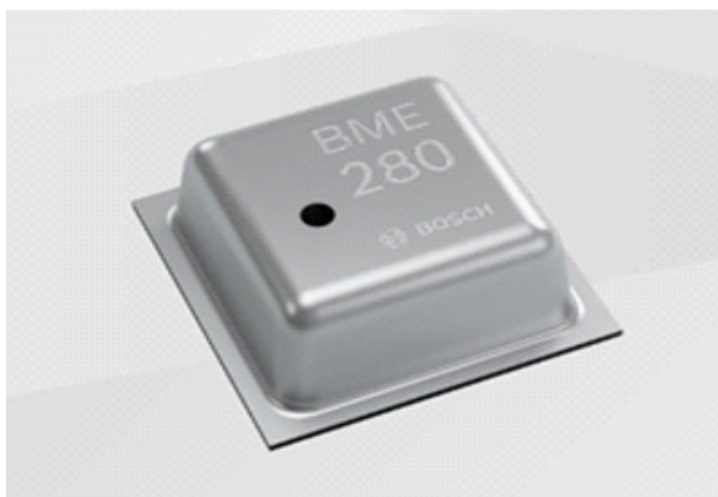
Pro GNSS bylo vybíráno mezi následujícími typy antén: flíčková, hélická a čipová. Čipová anténa má menší zisk, malé rozměry a pro aplikace, kde je kritické sledování polohy je méně vhodná. Flíčková anténa má vysoký zisk s vysokou směrovostí - plocha antény musí být orientována k vysílači (obloha). Hélická anténa má oproti flíčkové nižší zisk a menší směrovost. Ve ztížených podmínkách více odražených signálů (od budov) může hélická ukazovat viditelnost vyššího počtu satelitů, ale kvůli vícecestnému šíření je signál znehodnocen. Flíčková anténa při správném směřování zvládne za stejných podmínek potlačit dané signály díky vysoké směrovosti a určit tak polohu zařízení. Z uvedených variant byla vybrána flíčková anténa [35].

V LoRaWAN síti se nejčastěji používají lineárně polarizované antény typu dipól. Z tohoto důvodu je nejvýhodnější použít anténu stejného typu při zachování stejné orientace antény. Typická charakteristika vyzařování vykazuje nízký zisk ve vertikální rovině.

### 4.4 Výběr senzorů

Při řešení senzorů bylo prostudováno rozsáhlé měření nejčastěji používaných a cenově dostupných senzorů. Ve srovnání se nacházely senzory Aosong AM2302, AM2320, AM2321 známé pod názvem DHT22, Sensirion SHT71, Measurement Specialities HTU21D, Silicon labs Si7021 a BME280, který je zobrazen na Obr. 4.1. Závěr měření ukazuje, že senzor BME280 od firmy Bosch má celkově nejlepší vlastnosti, co se týká nezávislosti teploty a vlhkosti, hystereze při změně a konsistence hodnoty mezi měřeními. Jedinou nevýhodou je teplota, kterou ukazuje konstantně vyšší, ale i tak spadá do specifikací výrobce [36].

Senzor BME280 disponuje měřením vlhkosti, teploty a také atmosférického tlaku. To vše v miniaturním provedení. V jednom pouzdru se nachází 3 druhy senzorů, to má výhodu nižší ceny v poměru na senzor, ale i své nevýhody. Nevýhodou jsou rozdílné požadavky jednotlivých senzorů. Například senzor pro vlhkost musí být



Obr. 4.1: Vybraný senzor BME280

odhalen, aby měl co nejlepší výměnu vzduchu, kdežto senzor tlaku využívá piezorezistoru. Piezorezistor je ale náchylný na infračervené záření, které způsobuje změnu rezistence senzoru. Kompromisem při umístění do jednoho pouzdra je zakrytí proti vnikajícímu světlu a zároveň použití otvoru pro výměnu vzduchu. Otvorem se vzduch vyměňuje a zároveň nedopadá světlo na senzor tlaku. Kryt těla je vyrobený z plechu, který zároveň stíní proti elektromagnetickému záření [39].

Tab. 4.5: Technické parametry senzoru BME280

|                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| Rozměry [mm]                     | 2,5 x 2,5 x 0,93          |
| Komunikační sběrnice             | I2C, SPI (3 a 4 vodičové) |
| Napájecí napětí [V]              | 1,71 až 3,6               |
| Proudový odběr při čtení senzoru | 340 $\mu\text{A}$ vlhkost |
|                                  | 714 $\mu\text{A}$ tlak    |
|                                  | 350 $\mu\text{A}$ teplota |
| Ve stavu spánku                  | 0,1 $\mu\text{A}$         |

Z technického listu byly vypsány vybrané parametry, které jsou uvedeny v Tab. 4.5. Technologické principy, dle jakých se veličiny měří, si chce firma utajit. Při hledání byly nalezeny snímky z elektronového mikroskopu, které ukazují vnitřní strukturu senzoru. Ze struktury a popisu v daném článku byly zjištěny dále popisované principy.



### 4.4.1 Vlhkost

Senzor je tvořen dvěma elektrodami, přes které je nanášena tenká vrstva na bázi polymeru. Nanášená vrstva má pórovitou strukturu, která pohlcuje vlhkost. Struktura tvoří kapacitor. Absorpce vodních molekul způsobuje změnu dielektrické konstanty a tím i kapacitu vytvořeného kondenzátoru. Uvádí se možná přesnost kapacitního senzoru vlhkosti  $\pm 2\%$  v rozmezí 5–90 % relativní vlhkosti, což i přibližně odpovídá přesnosti BME280  $\pm 3\%$  pro rozsah 0–100 % [37].

### 4.4.2 Tlak

Senzor tlaku používá technologii MEMS (Mikro ElektroMechanical System). Senzor tvoří uzavřený prostor, potažený membránou, se známým referenčním tlakem. Z druhé strany je membrána exponována měřenému tlaku. V případě, že se zvýší měřený tlak, tak se membrána prohýbá směrem k uzavřenému prostoru. Prohnutí membrány způsobuje tenzometrické síly na jejím povrchu. Vzniklé síly snímají piezorezistory, které při namáhání mění svoji rezistenci. Piezorezistory jsou zapojeny ve Wheatstoneově můstku [40].

### 4.4.3 Teplota

Ze snímku z elektronového mikroskopu není poznat jaká technologie se využívá. Při hledání byla nalezen dotaz na oficiálních webových stránkách firmy BOSCH na využití technologie, kde se nacházela oficiální odpověď, že se využívá diodového napětí. Diody jsou známé teplotní závislostí. Z literatury o senzorech je patrné, že napětí na diodě velice lineárně roste s teplotou. Jedná se o jednoduché a levné řešení s nízkou spotřebou. V zapojení je proudový zdroj s diodou v sérii a napětí je měřeno na diodě [38].

## 4.5 Výběr napájecího článku

V reálném výběru primární baterie se nabízí ER34615 od firmy EVE BATTERY s parametry uvedenými v Tab. 4.6. Uvedená baterie má železné plošky pro přímé uchycení na plošný spoj nebo připájení přírodních vodičů, bez využití držáku. Jedinou nevýhodou může být cena 332 Kč [41].

Tab. 4.6: Technické parametry baterie ER34615

| ER34615                               |             |
|---------------------------------------|-------------|
| Nominální kapacita [mAh]              | 19000       |
| Maximální trvale odebíraný proud [mA] | 100         |
| Maximální špičkový proud [mA]         | 400 mA      |
| Hmotnost [g]                          | 100 g       |
| Rozměry [mm]                          | 33,1 x 61,5 |
| Provozní teplota [°C]                 | -60 až 85   |
| Samovybíjení za jeden rok [%]         | 1           |

Při zvážení výhod sekundárních a primárních článků byl zvolen sekundární článek. Jedním z důvodů byla nižší pořizovací cena a možnost opětovného nabití. Při vývoji zařízení v experimentální fázi budou odběry zařízení vyšší. Po konečném doladění všech spotřeb prvků by například pro komerční využití, kde by bylo zařízení připevněno k objektu, byla primární baterie výhodnější. Byl tedy vybrán akumulátor od firmy LG s označením 18650HG2 za cenu přibližně 130 Kč na Obr. 4.2. Kapacita je 3000 mAh, délka 65 mm a 18 mm průměr [42].

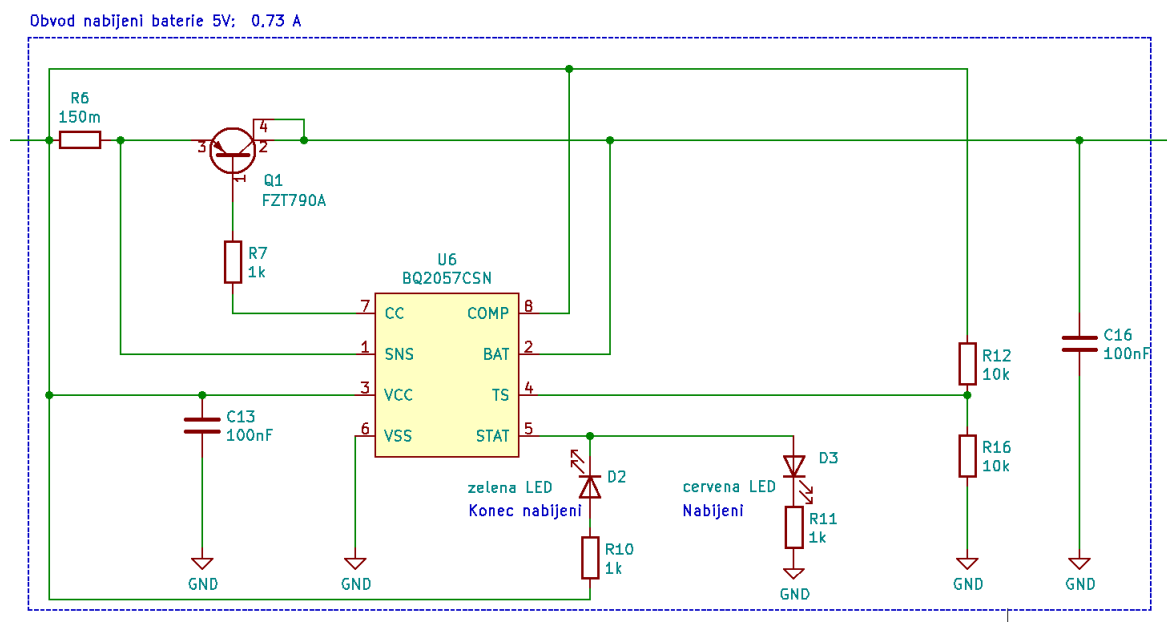


Obr. 4.2: Použitý akumulátor 18650HG2

## 4.6 Nabíjecí obvod akumulátoru

Pro nabíjení akumulátoru byl zvolen integrovaný obvod BQ2057CSN [43] uvedený na Obr. 4.3, který vyžaduje na vstupu pouze konstantní napětí 5 V z externího adaptéru. Integrovaný obvod byl zvolen kvůli nízkému odběru 1 uA ze strany akumulátoru v režimu spánku a také proto, že převádí rozdílové napětí adaptéru a akumulátoru na výkon, který je odváděn tranzistorem Q1. Je dosahováno mnohem nižší účinnosti oproti spínanému obvodu s induktorem, ale není vytvářeno rušení. Na nízké efektivitě nezáleží - adaptér je napájen z rozvodné sítě 230 V. Nabíjecí proud je nastaven rezistorem R6 na 0,73 A. Pokud je napětí akumulátoru nižší než 3,1 V tak je nabíjeno 10% nastaveného nabíjecího proudu kvůli omezení ztrátového výkonu na tranzistoru. Po překročení napěťové hladiny je akumulátor nabíjen nastaveným proudem až po napětí akumulátoru 4,2 V - řada integrovaného obvodu CSN. Možnost sledování teploty není využita - nastavení odporovým děličem R12, R16. Do nabíjecího bloku (ohraňováno čárkovanou čarou) je z levé strany přivedeno napětí adaptéru

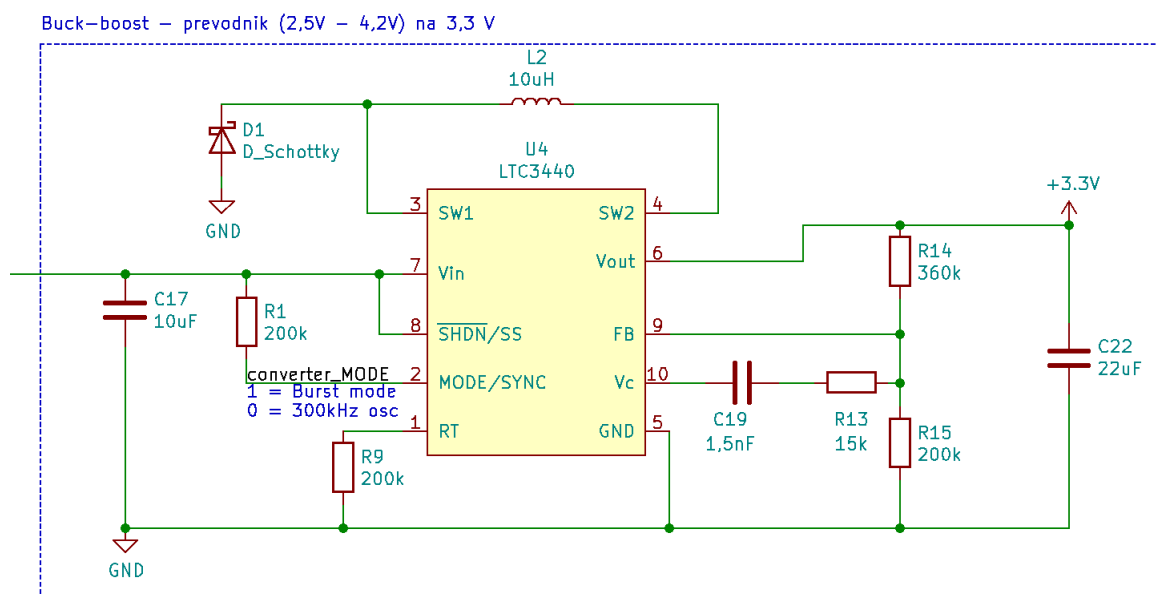
z USB mikro portu a z pravé strany je připojen akumulátor. V zapojení signalizuje LED označená jako D3 stav nabíjení a LED D2 konec nabíjení. V režimu spánku a při nedostatečném napětí adaptéru jsou obě LED zhasnuty. LED tedy v běžném provozu (zařízení napájeno z akumulátoru) neodebírají proud.



Obr. 4.3: Nabíjecí obvod

## 4.7 Napájecí obvod

Pracovní napětí akumulátoru se pohybuje v rozmezí 2,5 V až 4,2 V. Veškeré komponenty v obvodu pracují na logice 3,3 V. Pro plné využití kapacity akumulátoru je tedy potřeba v určitém rozmezí napětí snižovat a v druhé části zvyšovat. Pro tuto funkci se používá obvod s názvem buck-boost. Oproti například napětovým stabilizátorům, které napětový rozdíl akumulátoru a výstupního napětí promění v tepelný výkon, zde probíhají spínací cykly akumulčního prvku, které umožňují napětí nejen snižovat – buck, ale i zvyšovat – boost. Ztrátový výkon je teoreticky tvořen pouze nedokonalým spínáním. Vybrán byl integrovaný obvod LTC3440 [44], který je navržen pro jedno-článekový Li-ion akumulátor, viz. Obr. 4.4. Spínací frekvence byla nastavena odporem R9 na 300 kHz. Napětovým děličem R14 a R15 je nastaveno výstupní napětí na 3,36 V. Pro plánovaný odběr zařízení 50 mA byla nastavena spínací frekvence tak, aby dosahovala co nejvyšší účinnosti. Nejvyšší účinnost je přibližně 95 %.

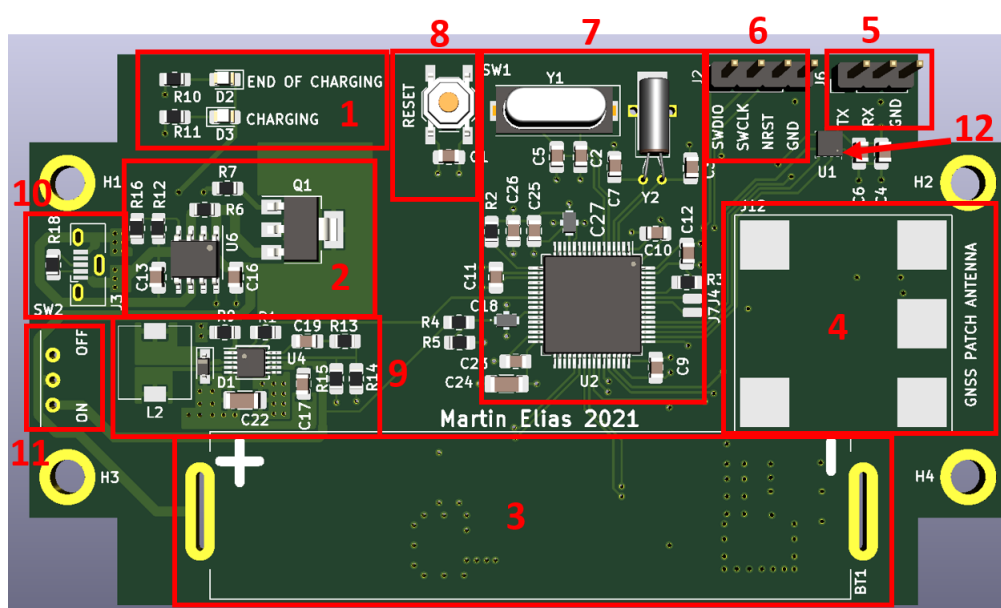


Obr. 4.4: Napájecí obvod

## 4.8 Návrh plošného spoje

Plošný spoj tvoří 4 vrstvy, což zmenšuje velikost výsledné desky, zmenšuje elektromagnetické vyzařování (EMI) a je více odolné vůči okolnímu rušení (EMS).

V současnosti je profesionální výroba plošného spoje cenově dostupná, například od firmy JLCPCB, kde byl plošný spoj vyráběn. Plošný spoj má rozměry 99 x 56 mm. Při využití profesionální výroby bylo nutné zohledňovat limitace výroby, které jsou uvedené na webových stránkách dané firmy. Jedna vnitřní vrstva plošného spoje byla využita jako zemnicí a druhá jako kladný pól napájecího napětí. Pro dosažení co nejnižšího rušení bylo dbáno na doporučení návrhu výrobce u spínací části napájecího obvodu. Jednotlivé bloky horní vrstvy plošného spoje jsou uvedeny na Obr. 4.5

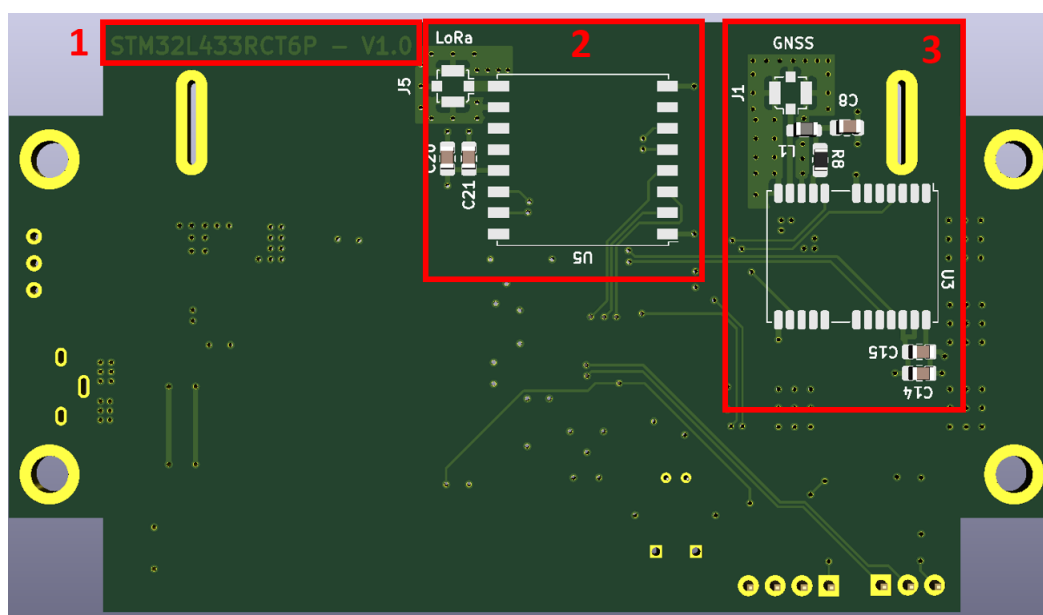


Obr. 4.5: 3D model horní strany plošného spoje

V bloku 1 se nachází dvě LED pro signalizaci nabíjení (Charging) a ukončení nabíjení (End of charging). LED znázorňující nabíjení má červenou barvu, konec nabíjení zelenou. Obvod obstarávající nabíjení je v bloku číslo 2, kde má tranzistor Q1 chladič plošku pro odvod tepla. Akumulátor je umístěn v bloku 3, uchycen je dvěma niklovými pásky, které byly nabodovány, aby nebylo nutné použít rozměrný držák. GNSS flíčková anténa je umístěna v části 4, kde se nachází vodivé plochy pro vertikální nebo horizontální uchycení antény. V 5. bloku je USART port pro získání diagnostiky zařízení. Programovací port pro programátor ST-LINK je umístěn v pravé horní části s číslem 6. Blok 7 zobrazuje zapojení procesoru. V 8. části je umístěn mikrospínač pro restart celého zařízení. Blok 9 obsahuje zapojení napájecího

obvodu, které mění napětí akumulátoru na požadovaných 3,3 V. Část 10 je USB mikro port pro nabíjení akumulátoru. V 11. části je umístěn přepínač pro zapnutí nebo vypnutí zařízení. V rozích plošného spoje se nachází montážní otvory označené H1 až H4 pro upevnění šrouby M3. Senzor měřených veličin se nachází na pozici 12.

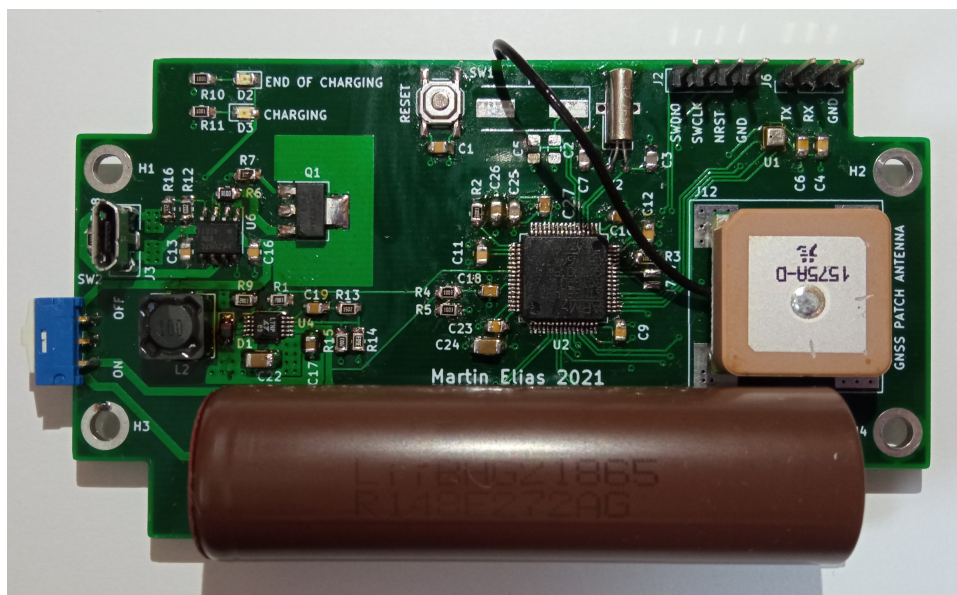
Vzhled spodní strany desky plošného spoje je zobrazen na Obr. 4.6. Označení hlavního procesoru STM32L433RCT6P je uveden v kolonce 1, napravo od označení procesoru se nachází verze návrhu. Blok 2 je zapojení LoRa modulu, označení J5 je konektor typu U.FL pro připojení antény. Třetí část zobrazuje zapojení GNSS modulu s označením konektoru J1 stejného typu jako J5. Pro vytvoření návrhu



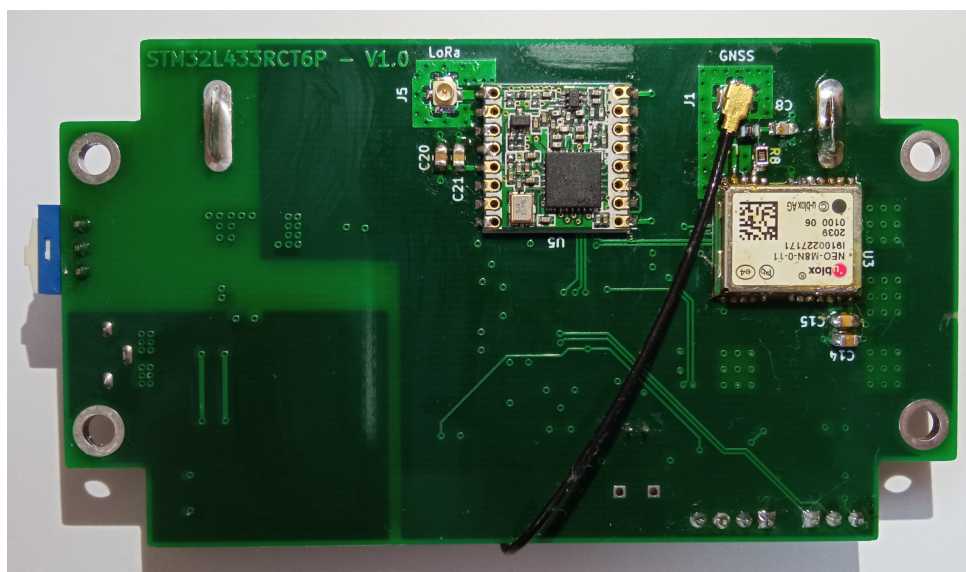
Obr. 4.6: 3D model dolní strany plošného spoje

plošného spoje byl použit program KiCad, který je volně dostupný bez omezení na počet vrstev a rozměry desky. Uvedený program lze využívat i pro komerční účely.

#### 4.8.1 Zhotovený výrobek

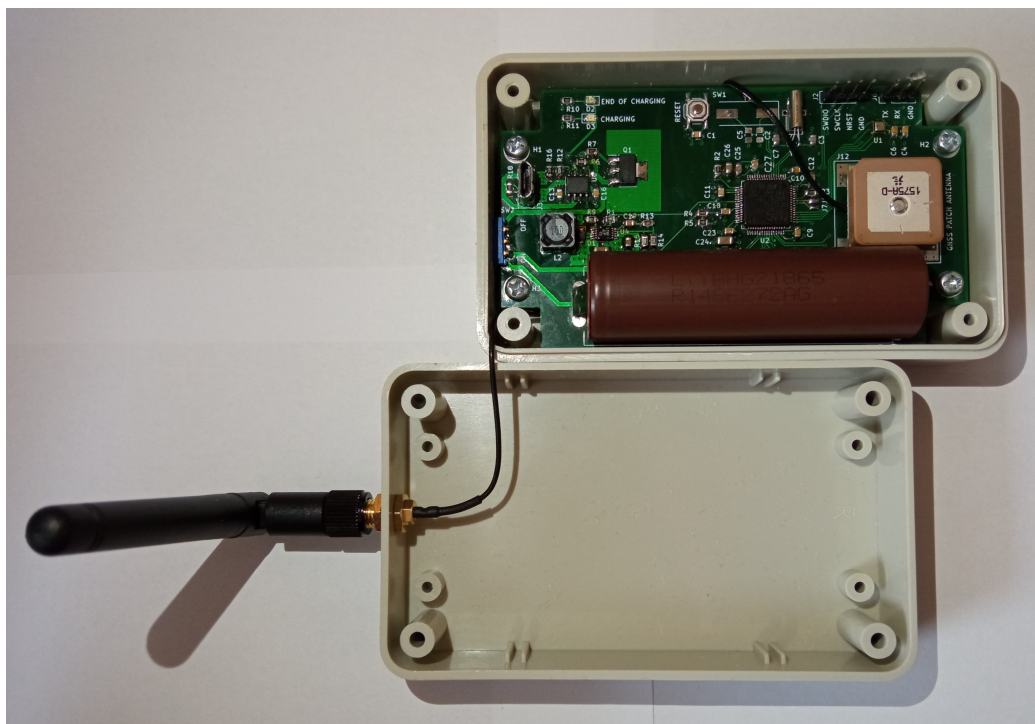


Obr. 4.7: Fotografie horní strany plošného spoje



Obr. 4.8: Fotografie dolní strany plošného spoje





Obr. 4.9: Vnitřní fotografie výrobku



Obr. 4.10: Vnější fotografie výrobku



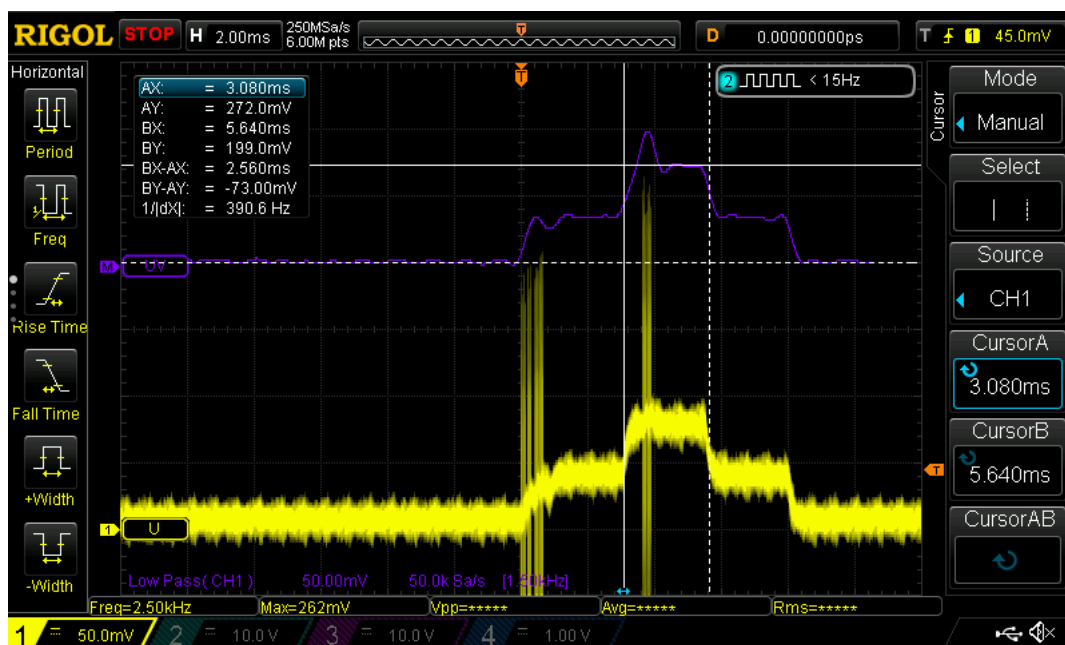
## 4.9 Měření

### 4.9.1 Senzor

Reálná spotřeba senzoru byla měřena předřazením  $100\ \Omega$  odporu, na kterém byl měřen průběh napětí osciloskopem, viz. Obr. 4.11. Byly očekávány proudy v řádech stovek  $\mu\text{A}$ . Dle Ohmova zákona se napětí změřené osciloskopem dá převést na odebíraný proud, pokud se hodnota vydělí 100. Rezistor měl přesnost hodnoty 1 %, což je zanedbatelná chyba. Změřený průběh obsahoval šum, proto byl vyfiltrován digitálním filtrem dolní propust s mezním kmitočtem 1,5 kHz. Z naměřených hodnot uvedených v Tab. 4.7 vyplývá, že jsou téměř totožné s uvedenými v produktovém listu.

Tab. 4.7: Reálná spotřeba senzoru

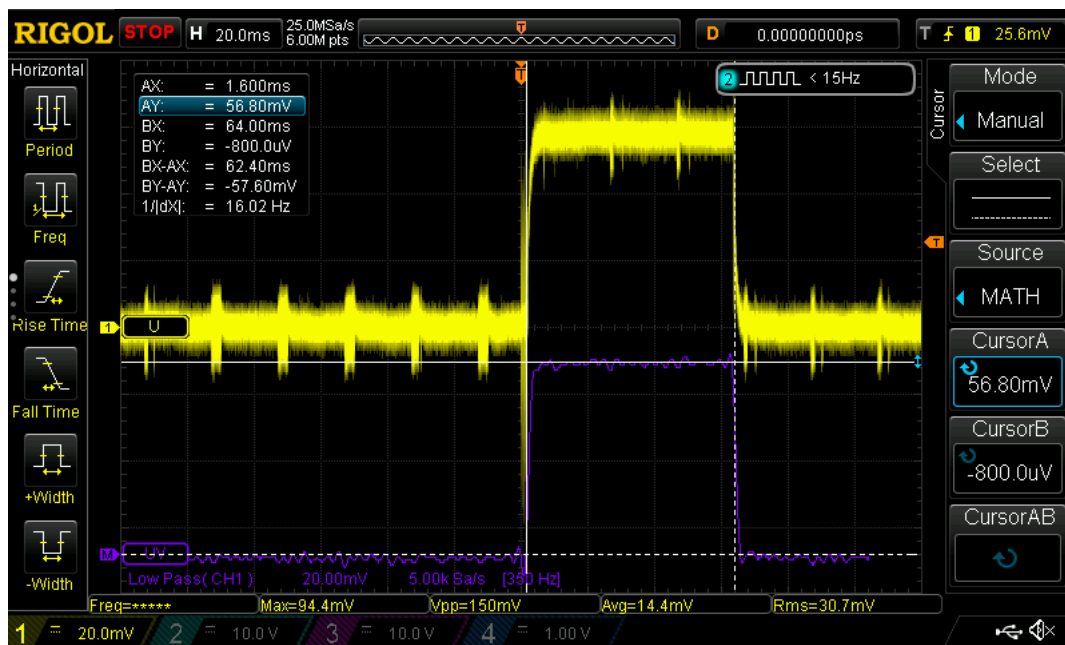
|         | Proud [ $\mu\text{A}$ ] | Doba trvání [ms] |
|---------|-------------------------|------------------|
| Teplota | 330                     | 3,16             |
| Tlak    | 730                     | 2,56             |
| Vlhkost | 330                     | 2,52             |



Obr. 4.11: Průběh spotřeby senzoru

### 4.9.2 LoRa modul

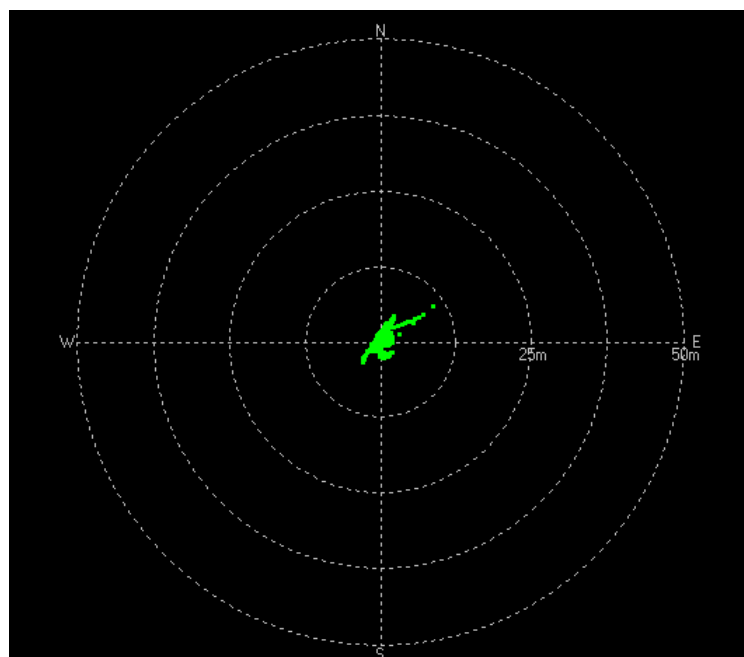
Měření na Obr. 4.12 probíhalo stejnou metodou jako u senzoru uvedeného výše. Místo použití  $100\ \Omega$  byl použit  $1\ \Omega$  a to z důvodu vyššího odběru. Měřené napětí na rezistoru odpovídá proudu. Odeslána byla zpráva o velikosti 10 B (plus 13 B hlavička) na rozprostíracím faktoru SF7 se šířkou pásma 125 kHz. Internetovým kalkulátorem byla spočítána doba vysílání na 61,7 ms a tomu i odpovídá šířka proudového odběru 62,4 ms. Při vysílání je odebírán proud 57,6 mA. Průběh byl vyfiltrován dolní propustí s mezním kmitočtem 350 Hz.



Obr. 4.12: Proudová spotřeba LoRa modulu

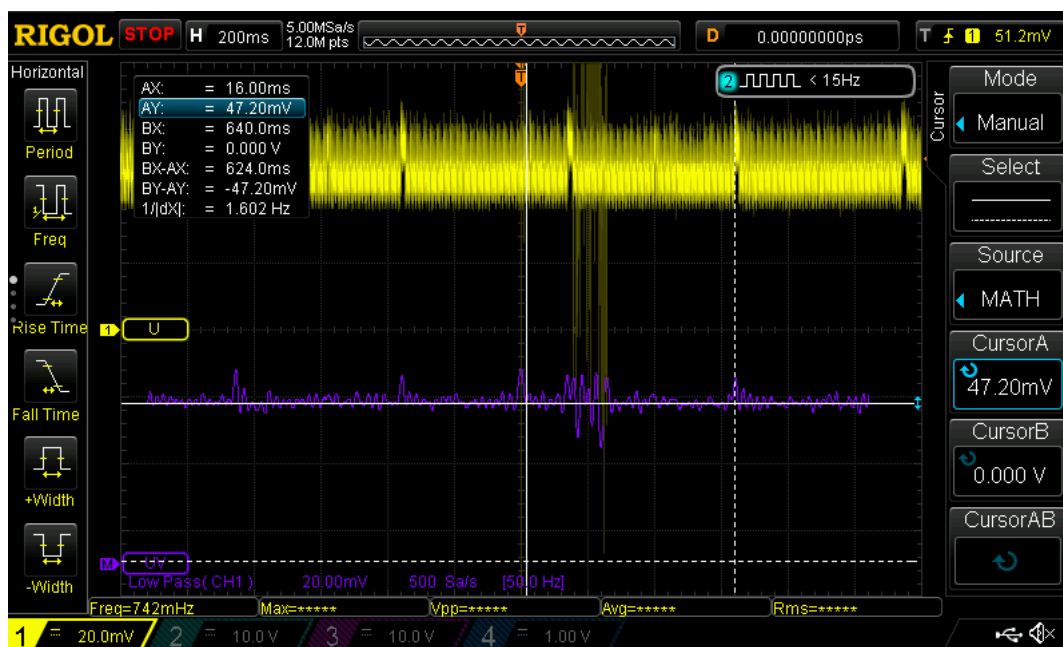
### 4.9.3 GNSS modul

Rozptyl a doba určení polohy se prováděla za reálných zhoršených podmínek, kdy anténa viděla méně než polovinu oblohy. Zařízení bylo umístěno pod přístřeškem a navíc vedle železobetonové zdi, kde mohly vzniknout odrazy. Měření probíhalo při využití konstelací GPS a GLONASS. Průměrná doba určení polohy při studeném startu byla 28,8 s a při pohotovostním režimu 4,8 s. Obě hodnoty jsou vyšší o 2,8 s od udávaných výrobcem. Rozdíl mohl být způsoben neideálními podmínkami. Rozptyl určení polohy je zobrazen na Obr. 4.13. Většina naměřených bodů spadala do rozptylu 10 m, z čehož lze usoudit, že přesnost polohy nemá význam posílat přesněji než na 10 m. Proudová spotřeba probíhala stejnou metodou jako u LoRa



Obr. 4.13: Rozptyl určení polohy

modulu a byla měřena při určování polohy. Použit byl filtr s mezním kmitočtem 500 Hz. Průměrný proud je 47,2 mA. Uvedené lze vidět na Obr. 4.14.



Obr. 4.14: Proudová spotřeba GNSS modulu

#### 4.9.4 Nabíjecí obvod

Obvod nabíjí akumulátor 0,72 A, průběh je lineární. Při nižší úrovni pod napětím 3,1 V bylo nabíjeno desetinou proudu. Doba nabíjení použitého akumulátoru (3000 mAh) při plném vybití 2,5 V je přibližně 4,5 hodiny.

### 4.10 Výpočet doby provozu na akumulátor

Doba provozu byla určena z reálně naměřených odběrů. LoRa modul RFM95W bude odesílat 145 zpráv za 24 h s rozprostíracím faktorem SF9 a šířkou pásma 125 kHz. Jedna zpráva bude obsahovat rozložení dat podle Tab. 4.8 a doba jedné zprávy, při tomto nastavení, je 205,8 ms. Před každým odesláním dojde ke změření dat ze senzoru a určení polohy. Mimo tuto dobu je procesor v režimu spánku.

Tab. 4.8: Rozložení dat zprávy

|                  | Velikost uplink [bit] |
|------------------|-----------------------|
| Teplota          | 7                     |
| Tlak             | 12                    |
| Vlhkost          | 7                     |
| GNSS souřadnice  | 48                    |
| Stav akumulátoru | 6                     |
| Celkem           | 80                    |

Nejdříve byly vypočítány spotřeby energie pro jednotlivé prvky. Vzorec 4.1 je vypočítaná energie jednoho měření senzoru pro teplotu, tlak a vlhkost.

$$\begin{aligned} E_{\text{senzor}} &= (I_{\text{teplota}} * T_{\text{teplota}} + I_{\text{tlak}} * T_{\text{tlak}} + I_{\text{vlhkost}} * T_{\text{vlhkost}}) * (U_{\text{nap.}}) = \\ &= (330 * 10^{-6} * 3,16 * 10^{-6} + 730 * 10^{-6} * 2,56 * 10^{-3} + 330 * 10^{-6} * 2,52 * 10^{-3}) * 3,3 = \\ &= 12,3526 \mu\text{J} \quad (4.1) \end{aligned}$$

Vzorec 4.2 vyjadřuje energii pro modul GNSS.

$$E_{\text{GNSS}} = (I_{\text{GNSS}} * T_{\text{GNSS}}) * (U_{\text{nap.}}) = (47,2 * 10^{-3} * 4,8) * 3,3 = 747,648 \text{ mJ} \quad (4.2)$$

Výsledkem Vzorce 4.3 je energie potřebná k poslání zprávy.

$$E_{\text{LoRa}} = (I_{\text{LoRa}} * T_{\text{LoRa}}) * (U_{\text{nap.}}) = (57,6 * 10^{-3} * 205,8 * 10^{-3}) * 3,3 = 39,118 \text{ mJ} \quad (4.3)$$

Podle 4.4 je určena energie, kterou spotřebuje procesor a ostatní komponenty.

$$\begin{aligned} E_{procesorrun} &= (I_{procesor} * T_{senzor,GNSS,LoRa}) * (U_{nap.}) = (22,7 * 5,01404) + 3,3 = \\ &= 375,602 \text{ mJ} \quad (4.4) \end{aligned}$$

Vzorec 4.5 určuje energickou spotřebu zařízení za celý den provozu.

$$\begin{aligned} E_{den} &= (\sum E * N_{zpravaden} + (I_{sleep} * (24 * 60 * 60 - \sum T * N_x) * U_{nap.})) = \\ &= 1,1624 * 145 + (8,3 * 10^{-3} * (24 * 60 * 60 - 5,014 * 145) * 3,3) = 2515,13 \text{ J}, \\ &\quad \text{kde } Nx \text{ je počet zpráv za den} \quad (4.5) \end{aligned}$$

$$e_{den} = E_{den}/3600 = 2515,13/3600 = 698,65 \text{ mWh} \quad (4.6)$$

Pomocí Vzorce 4.7 se došlo k výpočtu, že zařízení při daných odběrech může být v provozu 15,5 dne.

$$N_{dníprovozu} = (C_{akum} * U_{akum})/e_{den} = (3000 * 3,6)/698,65 = 15,5 \text{ dne} \quad (4.7)$$

## 4.11 Program

### 4.11.1 Program koncového zařízení

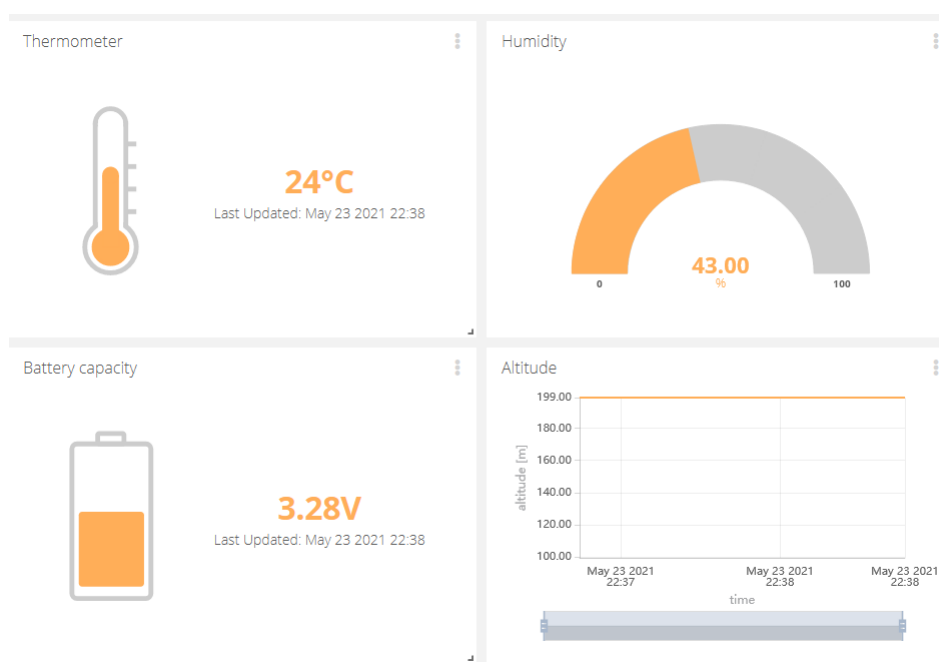
Běh programu je popsán v Příloha B. Veličiny jsou měřeny každých 10 minut a pokud dojde k jejich změně, jsou data zakódována do 10 B a odeslána přes LoRaWAN. Zařízení disponuje portem USART pro vlastní diagnostiku zařízení. Aktuálně prováděné operace zařízení jsou vypisovány. Kódování zprávy probíhá pomocí bitových operací. Zeměpisná šířka a délka je posílána s přesností na 10 metrů a je posílána jako celé číslo (24 bitů + 24 bitů). Při dekódování je převedena zpět na číslo desetinné. K teplotě je přičteno číslo 40 a je posílána s přesností na 1 °C. Číslo 40 je přičteno kvůli vyjádření záporných hodnot. Teplota nabývá hodnot od - 40 °C do + 87 °C. Vlhkost je posílána jako celá část čísla, hodnoty 0 % až 100 %. Nadmořská výška je zobrazena v rozmezí 0 až 4095 m.n.m (12 bitů). Rozsah napětí akumulátoru může být poslán v rozmezí 2,2 V až 4,4 V, kde je lineárně rozloženo 64 hodnot pro zvýšení přesnosti. Rozlišovací schopnost je přibližně 0,034 V. Složení posílané zprávy je uvedeno v Příloha A. Jednotlivé bity veličiny zprávy jsou číslovány od 0 (nejméně významný bit).

### 4.11.2 Dekódování zprávy

Program pro dekódování zprávy je prováděn na serveru TTN a byl napsán v jazyce JavaScript. Jedná se o inverzní postup zakódování. Data jsou dekódována a uložena do proměnných latitude, longitude, batteryVoltage, tempreture, altitude a humidity. Dekódovaná data jsou následně předána aplikačnímu serveru Ubidots.

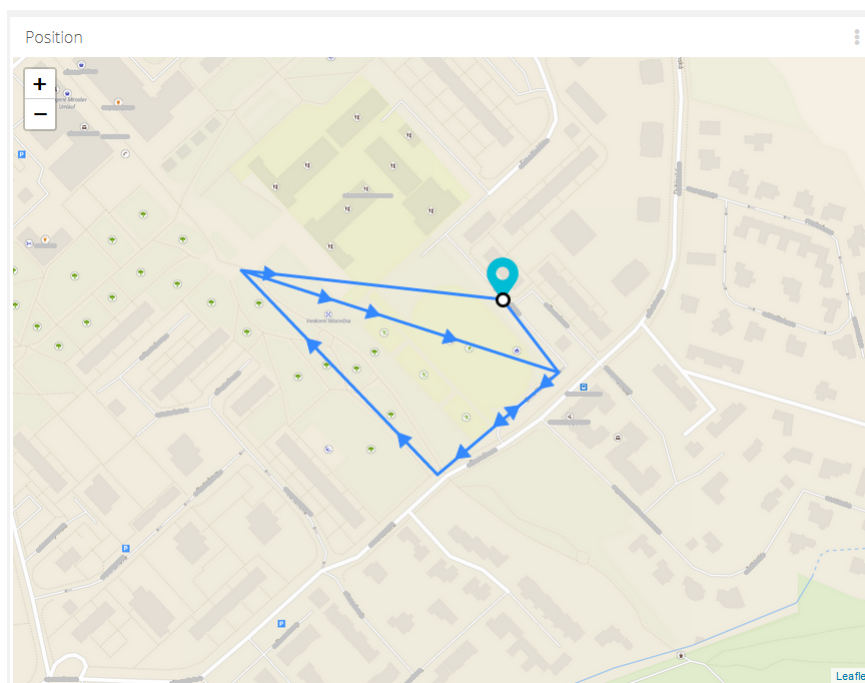
## 4.12 Vizualizace

Po dekódování přijaté zprávy jsou data odeslána na aplikační server Ubidots, kde probíhá jejich grafické zobrazení. Vizualizaci měřených veličin lze vidět na Obr. 4.15. Použitý server je zdarma, ale s omezením na 3 zařízení. Ukládá se i historie přijatých zpráv. Byly vytvořeny zprávy, které se odešlou, pokud se některé z veličin nachází mimo stanovené hodnoty. Upozornění je odesíláno na e-mailovou adresu.



Obr. 4.15: Vizualizace měřených veličin

Na mapě je zobrazena značkou aktuální poloha a historie pohybu. Pohyb zařízení je vyznačen pomocí šipek. Při roz kliknutí jednotlivých bodů lze získat podrobnější údaje jako čas a hodnoty měřených veličin. Na mapě byl určen rozsah polohy, kde se zařízení může pohybovat a při opuštění dané oblasti se odešle zpráva na e-mailovou adresu.



Obr. 4.16: Vizualizace polohy



## Závěr

Z probíraných IoT technologií byla vybrána síť LoRaWAN. Tato síť byla vybrána z důvodu možnosti vytváření vlastních přístupových bodů gateway a jejího víceúčelového použití v síti komerční, veřejné a soukromé. Do veřejné sítě TTN byla úspěšně nastavena a připojena vlastní gateway. Nastavení gateway byl složitý proces, kde při prvním pokusu byl nastaven chybně jeden parametr, který způsobil nemožnost se znovu připojit do panelu nastavení. Problém byl vyřešen přehráním systému. Této chybě bylo možné předejít použitím ochranného módu, kterým gateway disponuje. Mezi touto gateway a sestaveným node se následně podařilo navázat komunikaci. U všech komponentů bylo cíleno na nízký odběr pro dosažení co nejdelší doby provozu na akumulátor.

V teoretickém úvodu byly rozebrány IoT technologie, princip fungování globálního navigačního systému, srovnání primárních a sekundárních článků, kde bylo rozhodnuto o výhodě primárního článku u již optimalizovaného zařízení na nízkou spotřebu, a naopak vhodnosti sekundárního článku pro experimentální vývoj. Dále byla prostudována LoRa modulace a LoRaWAN protokol. Pro využití celkové kapacity napájecího článku byl vybrán napěťový měnič, který umožňuje využití celého napěťového rozsahu akumulátoru. Pro nabíjení akumulátoru byl zkonstruován nabíjecí obvod, který umožňuje nabíjení pomocí adaptéru s USB mikro konektorem. Bylo navrženo schéma zapojení a návrh plošného spoje. U odhadu doby provozu na akumulátor byly prakticky změřeny odběry navrhovaného zařízení. Výpočtem byla stanovena doba provozu pro vybraný akumulátor na 15,5 dne. Nejvíce se projevuje spotřeba GNSS modulu. Snížení spotřeby bylo dosaženo pomocí programové části, kde se procesor a ostatní komponenty uvedly do nízko výkonových režimů. U procesoru došlo ke snížení spotřeby i tak, že byla použita nízko výkonová řada procesoru s nižší frekvencí oscilátoru.

Plošný spoj byl navrhnout se 4 vrstvy, což umožnilo zmenšení rozměrů. Plošný spoj byl ručně osazen a otestován. V konstrukci nebyly nalezeny žádné chyby. Zařízení je umístěno v krabičce o velikost 105 x 65 x 40 mm pro praktičnost. Ke krabičce je připevněná polohovatelná anténa pro příjem a vysílání LoRa. Zařízení odesílá informace o své poloze, o stavu akumulátoru, naměřené teplotě, nadmořské výšce a vlhkosti. Data jsou odesílána v intervalu 10 minut, při detekci změny. Odesílané data jsou vizuálně zpracována na aplikačním serveru, kde je každé zařízení zaregistrováno a jednoznačně identifikováno. Uživatel má tak přehled o sbíraných datech a to umožňuje jejich další zpracování. Při výkyvu některé z hodnot se odešle upozornění na internetovou poštovní schránku. Lze si i stanovit oblasti na mapě, ze kterých, když se zařízení vzdálí, tak upozorní uživatele. Reálné využití se naskytuje pro hlídání předmětů proti odcizení. S tímto typem komunikace lze dosáhnout

vysokého dosahu při přímé viditelnosti koncového zařízení a gateway. V městských zástavbách lze dosáhnout dosahu bez přímé viditelnosti okolo 500 m. Nejvýhodnější je při aplikaci vlastní gateway umístění na vyvýšeném prostranství. Zařízení disponuje portem USART pro vlastní diagnostiku zařízení. Aktuálně prováděné operace zařízení jsou vypisovány na uvedený port. Možností, jak zařízení vylepšit, se nabízí další snižování velikosti zařízení a zvýšení optimalizace spotřeby.

# Seznam použitých zdrojů

- [1] MEKKI, Kais, Eddy BAJIC, Frederic CHAXEL a Fernand MEYER. *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*. *ICT Express* [online]. 2019, 5(1), 1-7 [cit. 2020-12-10]. ISSN 24059595. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ict.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005)
- [2] Pásmo ISM: *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 10. 12. 2020]. Dostupné z URL: [https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1smo\\_ISM](https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1smo_ISM).
- [3] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/12.2019-9*. Praha: Český telekomunikační úřad, 2019, ČTÚ-43 165/2019-613 [cit. 2020-10-12].
- [4] IOT TECHNOLOGIE: DO BUDOUCNOSTI S OPERÁTORY (5/5). *Eman.cz* [online]. 2019 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.eman.cz/blog/iottechnologie-budoucnost-5-5/>
- [5] Narrowband Internet of Things (Nb-IoT). In: *VIAVI solutions* [online]. 2018 [cit.2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/enus/literature/narrowband-internet-things-nb-iot-celladvisor-jd700b-seriesapplication-notes-en.pdf>
- [6] GPS trackery jako chytré řešení ochrany vozidel. *CRA* [online]. 2018 [cit. 2020-12-10]. [Dostupné z: https://www.cra.cz/gps-trackery-jako-chytre-reseni-ochranyvozidel](https://www.cra.cz/gps-trackery-jako-chytre-reseni-ochranyvozidel)
- [7] *Sigfox Technical Overview* [online]. 2017-05, , 1-26 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.disk91.com/wpcontent/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- [8] O nás/VOP/Ceník. *První celorepublikový mobilní operátor pro internet věcí* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://sigfox.cz/cs/onas/cenik-vop>
- [9] Coverage. *Sigfox* [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- [10] What is LoRaWAN. *A technical overview of LoRa and LoRaWAN* [online]. 2015-11, , 1-20 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://loro-alliance.org/resourcehub/what-lorawanr>
- [11] Map. *Building a global open LoRaWAN™ network*. [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/map>

- [12] Informativní mapa pokrytí služeb. In: *Propojujeme firmy a lidi se zájmem v internetu věcí / IoTPort* [online]. Česká republika, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://www.iotport.cz/files/mapa/map\\_full.png](https://www.iotport.cz/files/mapa/map_full.png)>
- [13] Objednáváte připojení k IoT síti LoRa. *Propojujeme firmy a lidi se zájmem v internetu věcí / IoTPort* [online]. Česká republika, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.iotport.cz/objednavka-lorawan>>
- [14] How does a GNSS receiver work?. *OxTS - the inertial navigation (INS) experts since 1998*. [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.oxts.com/gnss-receiver>>
- [15] Software Defined GPS: Find the signal in the noise. *Software Defined GPS* [online]. 2016 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<http://sdrgps.blogspot.com/2016/02/find-signal-in-noise.html>>
- [16] Choices of Primary Batteries - Battery University. *Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://batteryuniversity.com/learn/article/choices\\_of\\_primary\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/choices_of_primary_batteries)>
- [17] Primary (non-rechargeable) Batteries – Battery University. *Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://batteryuniversity.com/learn/article/primary\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/primary_batteries)>
- [18] Secondary (Rechargeable) Batteries – Battery University. *Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)>
- [19] Lead-based Batteries Information – Battery University. *Basic to Advanced Battery Information from Battery University* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lead\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lead_based_batteries)>
- [20] Jak dobrá je bezdrátová technologie LoRa?. In: *Schmidiger GmbH* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.schmidiger.ch/assets/images/Chirp-Spread-Spectrum-Modulation.jpg>>
- [21] FERRÉ, Guillaume a Eric SIMON. *An introduction to Sigfox and LoRa PHY and MAC layers* [online]. 2018 [cit. 2020-12-13]. hal-01774080.

- [22] Frequency Plans. *The Things Network* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans.html>>
- [23] Duty Cycle. *The Things Network* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html>>
- [24] Airtime calculator for LoRaWAN. *Single Page Apps for GitHub Pages* [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://avbentem.github.io/airtimecalculator/ttn/eu868>>
- [25] Device Registration. *The Things Network* [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/devices/registration.html>>
- [26] Single-channel gateways. *The Things Network* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/start/singlechannel.html>>
- [27] Adventures with Lora: Building a single channel Lorawan Gateway using an ESP8266 NodeMCU and HoperRF RFM95W radio. *Adventures with Lora* [online]. 2016 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<http://talk2loro.blogspot.com/2016/10/building-lorawan-gateway-usingesp8266.html?m=1>>
- [28] RAK831. *The Things Network* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/rak831/>>
- [29] Build your own gateway. *The Things Network* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/start/build.html>>
- [30] MikroTik Routers and Wireless - Products: wAP LR8 kit. *MikroTik Routers and Wireless* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://mikrotik.com/product/wap\\_lr8\\_kit](https://mikrotik.com/product/wap_lr8_kit)>
- [31] Disk91.com – technology blog: *Technology, hardware, security, hacking (DiY), IoT* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.disk91.com/2020/technology/lora/mikrotik-lora8-gateway/>>
- [32] Low Power Long Range Transceiver Module: Model No.:RFM95W/96W/98W. In: *Professional RF IC & modules and Digital Sensor designer and manufacturer Shenzhen Hope Microelectronics Co., Ltd* [online]. 2018 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <<http://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>>

- [33] Low-Power Long Range LoRa® Technology Transceiver Module. In: *Microchip Technology Inc.* [online]. © 2015-2017 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/50002346c.pdf>>
- [34] NEO-M8: u-blox M8 concurrent GNSS modules. In: *u-blox* [online]. 2016 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3\\_DataSheet\\_%28UBX-15031086%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_%28UBX-15031086%29.pdf)>
- [35] GNSS antennas: RF design considerations for u-blox GNSS receivers. *U-blox* [online]. 2018 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GNSS-Antennas\\_AppNote\\_%28UBX-15030289%29.pdf?fbclid=IwAR0dQQ012PC4-P8F45otgdUeqAQmL567UqBuXJgt2m6zovPRDPIzhwXURQw](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GNSS-Antennas_AppNote_%28UBX-15030289%29.pdf?fbclid=IwAR0dQQ012PC4-P8F45otgdUeqAQmL567UqBuXJgt2m6zovPRDPIzhwXURQw)>
- [36] Compare DHT22, AM2302, AM2320, AM2321, SHT71, HTU21D, Si7021, BME280. *Kimberly & Robert's Home Page* [online]. 2018 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <[https://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib\\_many.html](https://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_many.html)>
- [37] Humidity Sensor BME280 | Bosch Sensortec. *Combined humidity and pressure sensor* [online]. 2018-09, (-280-002-15), 1-55 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.boschsensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>>
- [38] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* [online]. 4th. New York, NY: Springer New York, 2010 [cit. 2020-12-13]. ISBN 978-1-4419-6465-6.
- [39] BME280 measuring principle. In: *Bosch Sensortec Community* [online]. 2019 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://community.boschsensortec.com/t5/MEMS-sensors-forum/BME280-measuring-principle/mp/7702/highlight/true#M620>>
- [40] How does a Pressure Sensor Work - Physics of Probeware. *PocketLab* [online]. 2019 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.thepocketlab.com/educators/lesson/how-does-pressure-sensor-workphysics-probeware>>
- [41] EVE ER34615CNR EVE BATTERY CO. - Baterie: lithiové. *Elektro-nické díly. Distributor a obchod online - Transfer Multisort Elektronik* [online]. 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.tme.eu/cz/details/eveer34615cnr/baterie/eve-battery-co/eve-er34615cnr/>>

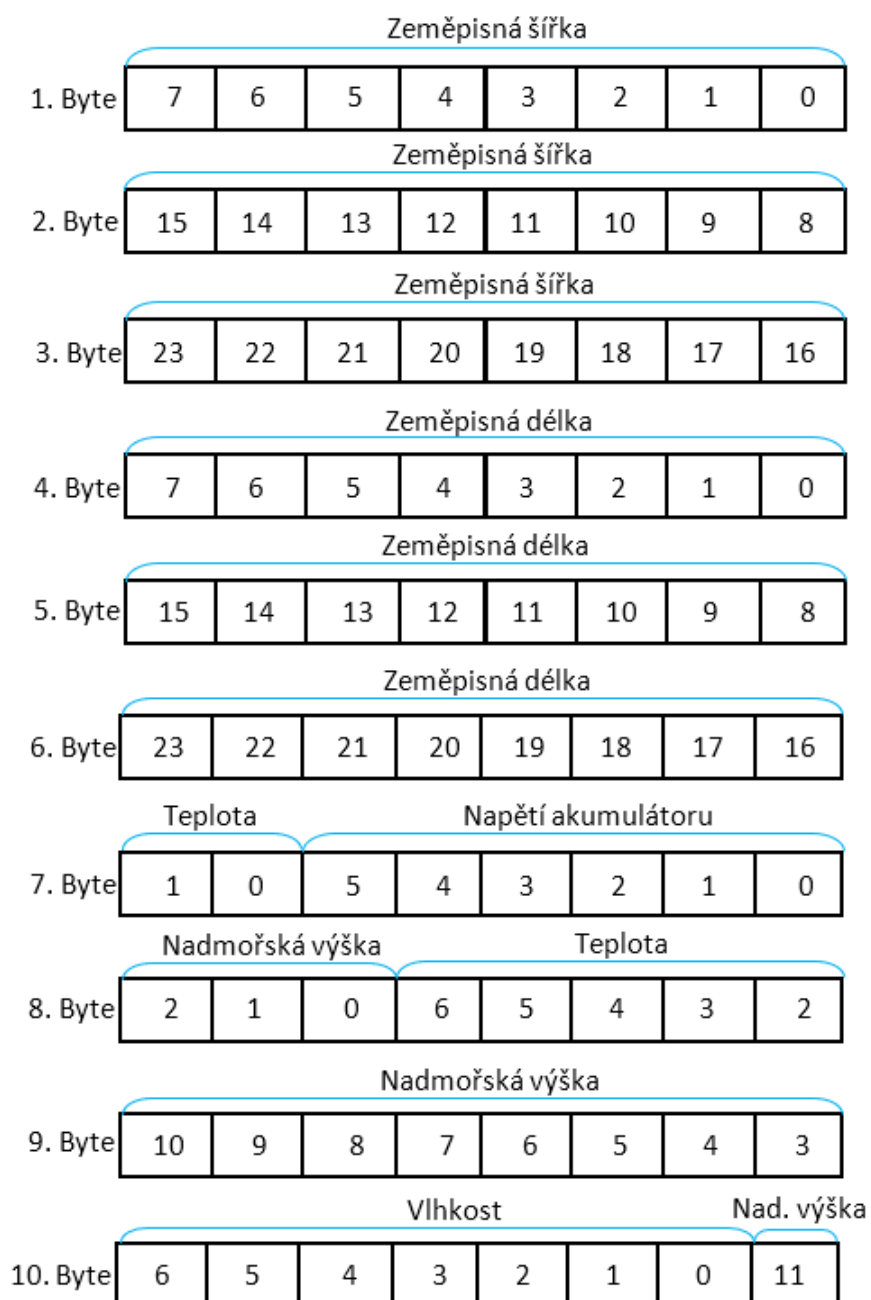
- [42] Technical Information of LG 18650HG2 (3.0Ah). In: *NKON* [online]. 2014 [cit.2020-12-13]. Dostupné z: <<https://www.nkon.nl/sk/k/hg2.pdf>>
- [43] BQ25302 Standalone 1-Cell 2.0-A Buck Battery Charger. In: *Analog / Embedded Processing / Semiconductor Company* [online]. 2020 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25302.pdf?ts=1607935659285&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25302.pdf?ts=1607935659285&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)>
- [44] LTC3440 Datasheet and Product Info | Analog Devices. In: *Mixed-signal and digital signal processing ICs / Analog Devices* [online]. 2001 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <<https://www.analog.com/en/products/ltc3440.html#productoverview>>

# Seznam příloh

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| A Složení posílané zprávy   | 60 |
| B Vývojový diagram programu | 61 |



## A Složení posílané zprávy



## B Vývojový diagram programu

